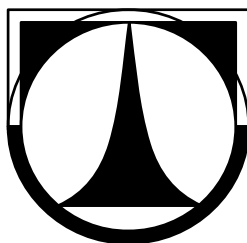


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



Disertační práce

**Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému
vstřikovacího nástroje**

2008

Ing. Josef Půta

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Obor 23-03V Strojírenská technologie

zaměření
Zpracování plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

**Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému
vstřikovacího nástroje**

**Melt Pressure Control inside Hot Runner System of the
Injection Mold**

Ing. Josef Půta

Školitel: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	131
Počet obrázků:	98
Počet tabulek:	18
Počet příloh:	6

Anotace

Téma práce: **Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje**

Disertační práce se zabývá vývojem a analyzováním nové technologie vstřikování termoplastů spočívající v řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje a porovnáním této technologie s běžnou konvenční technologií kaskádového vstřikování. V teoretické části práce je proveden rozbor procesu plnění dutiny vstřikovacího nástroje taveninou, vlivů technologických parametrů na technologii vstřikování a porovnání způsobů řízení vstřikovacího procesu. Experimentální část je zaměřena na porovnání analyzovaných technologií z hlediska průběhu vstřikovacího procesu, především pak na tlakové poměry během procesu a vliv technologií na vlastnosti výstřiků a stabilitu procesu. Experimentální měření jsou doprovázena softwarovými simulacemi.

Klíčová slova: Řízení vstřikovacího procesu, tlak v dutině nástroje, stabilita procesu

Annotation

Theme of dissertation: **Melt Pressure Control inside Hot Runner System of the Injection Mold**

The dissertation work deals with development and analyzing of new injection technology for thermoplastic materials and with the comparison of this new technology with the common cascade injection technology. The new technology lies in the melt pressure control inside hot runner system of the injection mold. In theoretical part of the dissertation there are described the filling process of the mold with the plastic melt, influence of technological parameters on injection technology and comparison of different ways of controlling the injection process. The experimental part is focused on comparison of analyzed technologies from the injection process behaviour point of view, mainly focused on pressure conditions during the injection process and technologies influence on properties of injected parts and process stability. The experimental measuring is accompanied with the software simulations.

Keywords: Injection process control, Cavity pressure, Process stability

Annotation

Thema der Dissertation:

Schmelzedruckregelung im Heißkanalsystem des Spritzgießwerkzeuges

Die vorgelegte Dissertationsarbeit befasst sich mit der Entwicklung und Analysierung der neuen Spritzgießtechnologie von Thermoplasten und mit dem Vergleich dieser neuen Technologie mit der konventionellen Kaskadespritzgießtechnologie. Die neue Technologie liegt in der Schmelzedruckregelung im Heißkanalsystem des Spritzgießwerkzeuges. Im theoretischen Teil der Dissertationsarbeit ist der Spritzgießwerkzeugesfüllprozess des Schmelzes beschreibt. Hier spricht man auch vom Einfluss der technologischen Parameter auf Spritzgießtechnologie und man vergleicht verschiedene Steuerungen des Spritzgießprozesses. Der Experimentaltteil konzentriert sich auf den Vergleich von analysierten Technologien unter dem Gesichtspunkt vom Spritzgießprozessablauf, vor allem auf Druckbalancen während des Prozesses, man behandelt auch den Einfluss von Technologien auf Gespritzteileigenschaften und Prozessstabilität. Die Softwaresimulationen begleiten die Experimentalmessungen.

Schlagwörter: Spritzgießprozess, Werkzeugdruck, Prozessstabilität

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací.

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultations.

Datum / Date: 28.8.2008

Podpis / Signature :

Poděkování:

Především bych chtěl poděkovat zaměstnancům společnosti Cadence Innovation - Libáň, zvláště pak Ing. Aleši Průškovi, CSc. za vstřícnost a umožnění provádět analýzy v rámci experimentální části disertační práce.

Dále děkuji všem, kteří mi poskytli cenné rady a připomínky při vypracování mé disertační práce, především pak Ing. Aleši Auspergerovi, Ph.D. a doc. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi.

Poděkování patří v neposlední řadě i mé rodině za podporu během mého studia a plné pochopení časové náročnosti disertační práce.

Patrikovi

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
1 ÚVOD	13
1.1 Nejnovější přístupy v řízení technologie vstřikování.....	13
1.2 Cíle disertační práce	15
2 TEORETICKÁ ČÁST	16
2.1 Fáze procesu technologie vstřikování	16
2.2 Reologické vlastnosti tavenin plastů	17
2.2.1 Viskoelasticita tavenin plastů.....	21
2.3 Proces plnění dutiny vstřikovacího nástroje	22
2.4 Tlakové poměry při procesu vstřikování plastů	24
2.4.1 Průběh tlaku v dutině nástroje během vstřikovacího cyklu	25
2.4.2 Vliv vybraných technologických parametrů na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje	27
2.5 Diagram p-v-T.....	32
2.5.1 Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T	35
2.5.2 Vliv dráhy toku na vstřikovací cyklus v p-v-T diagramu	37
2.6 Řízení vstřikovacího procesu	38
2.6.1 Vliv viskozity taveniny na rychlost pohybu šneku	39
2.6.2 Vliv kolísání doby vstřiku na tlak v dutině nástroje	40
2.6.3 Řízení vstřikovacího procesu pomocí uzavřené a otevřené smyčky.....	41
2.6.4 Optimální řízení vstřikovacího procesu	42
2.7 Nástroje pro vstřikování termoplastů a řízení trysek vtokového systému	43
2.7.1 Technologie konvenčního kaskádového vstřikování	45
2.7.2 Technologie vstřikování pomocí řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje	46
2.8 Metody měření tlaku v dutině formy	48
2.9 Hodnocení způsobilosti procesu a analýza rozptylu	49
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	51
3.1 Charakteristika použitých materiálů	52
3.2 Vstřikovací nástroj	55
3.2.1 Horký vtokový systém vstřikovacího nástroje.....	58



3.3 Řízení vstřikovacího procesu	59
3.3.1 Nastavení technologických parametrů na stroji při vstřikování technologií konvenčního kaskádového vstřikování	61
3.3.2 Nastavení technologických parametrů na stroji při vstřikování technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.....	64
3.3.3 Princip vstřikování výrobků a řízení otevírání trysek horkého rozvodu vstřikovacího nástroje	66
3.4 Softwarové simulace procesu plnění.....	68
3.5 Snímání tlaku v dutině nástroje.....	71
3.6 Rozbor vstřikovacího procesu.....	72
3.6.1 Rozbor vstřikovacího procesu technologie konvenčního kaskádového vstřikování.....	72
3.6.2 Rozbor vstřikovacího procesu technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje	77
3.6.3 Porovnání průběhů vnitřních tlaků v dutině nástroje během vstřikovacího procesu	81
3.6.4 Porovnání průběhů pozic šneku během vstřikovacího procesu	84
3.6.5 Porovnání průběhů systémových tlaků během vstřikovacího procesu	86
3.6.6 Softwarová simulace tlakové bilance vstřikovacího procesu.....	88
3.6.7 Porovnání průběhů reálných a simulovaných tlaků v dutině nástroje.....	93
3.7 Analýza homogenity mechanických vlastností výstřiků.....	95
3.7.1 Vliv dráhy toku taveniny v dutině nástroje na pevnost ve střihu a tlak v dutině nástroje	101
3.8 Rozbor vnitřního pnutí výstřiků	103
3.9 Rozbor hodnocení způsobilosti vstřikovacího procesu a analýza rozptylu naměřených hodnot	106
3.9.1 Způsobilost vstřikovacího stroje	107
3.9.2 Analýza způsobilosti vstřikovacího procesu při krátkodobých zkouškách	107
3.9.3 Analýza rozptylu naměřených hodnot	112
3.9.4 Hodnocení způsobilosti vstřikovacího procesu.....	113
3.10 Diskuze výsledků experimentálního měření	116

4 ZÁVĚR	121
5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	125
6 SEZNAM PUBLIKACÍ	128
7 SEZNAM PŘÍLOH	131

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	označení pro plast tvořený materiálem Daplen EE137HP s příměsí 3 % barviva Onyx 10-9816F/PP
B	označení pro plast tvořený materiálem Daplen EE137HP s příměsí 3 % barviva Silbergrau 10-80069F/PP
C	označení pro plast tvořený ze 67 % materiálem Daplen EE137HP, 3 % barviva Onyx 10-9816F/PP a 30 % regranulátu materiálu Daplen EE137HP
C_m	index způsobilosti strojního zařízení
C_{mk}	index způsobilosti strojního zařízení zohledňující polohu znaku jakosti vůči tolerančním mezím
C_{mL}	dolní index způsobilosti strojního zařízení
C_{mU}	horní index způsobilosti strojního zařízení
C_p	index způsobilosti procesu
C_{pk}	index způsobilosti procesu zohledňující polohu znaku jakosti vůči tolerančním mezím
C_{pL}	dolní index způsobilosti procesu
C_{pU}	horní index způsobilosti procesu
E	aktivační energie viskózního toku [$J \cdot kg^{-1}$]
F	smysková síla [N]
h	tloušťka vrstvy tekoucí taveniny plastu [m]
KK	označení pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování
l	délka kapiláry [mm]
LCL	dolní regulační mez
LSL	dolní toleranční mez
m	exponent mocninového zákona
MFR	Melt mass – flow rate, hmotnostní index toku taveniny termoplastů [$g \cdot 10^{-1} \cdot min^{-1}$]
O	otevřeno
p	tlak [bar], [MPa]
p_c	tlakový rozdíl [MPa]
$p_{\check{c}}$	tlak před čelem šneku ve vstřikovací jednotce [bar]



p_d	tlak dotlaku [bar]
p_e	tlak potřebný na překonání elastického odporu taveniny [MPa]
p_f	tlak v dutině formy [bar]
p_{f1}	tlak v dutině formy v místě 1 [bar]
p_{f2}	tlak v dutině formy v místě 2 [bar]
p_{fd}	tlak v dutině formy na konci fáze dotlaku [bar]
p_s	systémový tlak [bar]
p_v	tlak ve vtokovém systému nástroje [bar]
p_q	tlak potřebný na překonání viskózních odporů taveniny [MPa]
r	průměr kapiláry [mm]
R	rozpětí
\bar{R}	průměrné rozpětí
R_m	materiálová konstanta analogická plynové konstantě [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
RT	označení pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstříkovacího nástroje
S	smyková plocha [m^2]
s	dráha [mm]
s_K	poloha šneku [mm]
s_N	poloha nástroje [mm]
s_v	dráha toku taveniny v dutině nástroje [mm]
t	čas [s]
t_c	doba cyklu [s]
t_d	doba dotlakové fáze [s]
t_{ch}	doba chlazení [s]
t_m	doba manipulace [s]
t_{pl}	doba plastikace [s]
t_{s1}	doba strojní pro uzavření formy [s]
t_{s2}	doba strojní pro přisunutí plastikační jednotky [s]
t_{s3}	doba strojní pro otevření formy [s]
t_v	doba vstříkovací fáze [s]
T	teplota [$^{\circ}\text{C}$], [K]
T_f	teplota formy [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{př}$	přechodová teplota plastu polymeru [K]



T_t	teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]
UCL	horní regulační mez
USL	horní toleranční mez
v	měrný objem [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$], [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$]
v_p	rychlost pohybu krajní vrstvy taveniny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
v_{st}	střížná rychlost [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_x	variační koeficient
$v_{\bar{x}}$	variační koeficient průměrných hodnot
\bar{x}	aritmetický průměr hodnot
$\bar{\bar{x}}$	průměr procesu
Z	zavřeno
Φ	koeficient tekutosti [s^{-1}]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost [s^{-1}]
η	dynamická viskozita taveniny [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
η_0	dynamická viskozita při $T = 0\text{K}$ [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
η_N	newtonská viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
η_{∞}	viskozita při nekonečném smyku [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
η_{zd}	zdánlivá viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
π	vnitřní tlak ve hmotě [MPa]
σ	výběrová směrodatná odchylka
σ_S	směrodatná odchylka základního souboru
τ	smykové napětí [Pa]
τ_s	pevnost materiálu ve stříhu [MPa]
ω	měrný objem polymeru při 0 K [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

1 ÚVOD

Zpracování plastů patří k dynamicky se rozvíjejícím progresivním technologiím. Jednou z nejrozšířenějších výrobních technologií v oblasti zpracování plastů je technologie vstřikování, kterou je v dnešní době zpracovávána více jak třetina termoplastů [5].

Průnik termoplastických materiálů do vyspělých technických aplikací přináší stále se zvyšující požadavky na technologii vstřikování. Pro zachování konkurenceschopnosti výrobci výstřiků neustále sledují trendy nových technologií vstřikování plastů nebo sami vyvíjejí technologie nové, které jsou modifikacemi konvenční technologie vstřikování a jsou odrazem požadavků praxe na moderní proces vstřikování.

Modifikace technologie vstřikování plastů nejsou směřovány jen k rozšíření možností konvenční technologie s ohledem na složité tvary a zvýšené požadavky na vlastnosti výrobku, mezi které patří například využívání kombinací vstřikování termoplastů s různými médii, především pak vody a dusíku, vstřikování s nadouvadly a zastříkávání různých materiálů plastem, ale i k hledání nových přístupů v řízení technologie vstřikování s cílem rozšíření možností řízení vstřikovacího procesu, zefektivnění výroby, zkvalitnění výrobků a v neposlední řadě zvýšení stability výrobního procesu pro zmenšení zmetkovitosti.

Mezi technologie hledající nové lepší způsoby řízení vstřikovacího procesu patří i technologie, která je tématem předložené disertační práce. Tato nová technologie spočívá v řízení vstřikovacího procesu ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje a vnáší zcela nový pohled na vstřikování plastů, především pak při výrobě velkorozměrných dílů.

1.1 Nejnovější přístupy v řízení technologie vstřikování

V dnešní době je možné využít řadu modifikací technologie vstřikování, které přinášejí nové možnosti v řízení vstřikovacího procesu. Jedná se buď o jemné nyanse od konvenční technologie vstřikování, anebo razantně odlišné přístupy v oboru vstřikování plastů.

Mezi modifikace technologie vstřikování plastů s jemnými nyansemi je možné

zařadit například nový způsob řízení přepnutí na dotlak pomocí teploty uvnitř dutiny nástroje testované firmou Priamus System Technologies AG [27, 39].

Balancováním vícevtokových horkých rozvodů za účelem dosažení optimálních podmínek plnění dutiny vstřikovacího nástroje se zabývá firma Ewikon, která k ovlivnění tlakových poměrů ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje využívá systému krokových motorů, kterými řídí polohy jehel uvnitř trysek vtokového systému [28, 40].

Pro vstřikování s vícenásobnými nástroji firma Kistler propojila do uzavřené smyčky svůj systém pro analyzování tlaku v dutinách nástroje CoMo a horký vtokový systém MultiFlow. Na základě tlaku v dutině nástroje jsou systémem nastavovány teploty na horkých rozvodech vtokového systému pro zajištění maximálně rovnoměrných, synchronních podmínek plnění dutin u vícenásobných nástrojů [41, 42].

Za razantnější nové přístupy ve vstřikování je možné uvést jako příklad technologii vstřikování do dutiny nástroje proti tlaku plynu GGD (Gasgegendruck), podrobně analyzovanou institucí IKV a firmou ENGEL. Přínosem tohoto způsobu vstřikování je především vytváření kvalitního povrchu u termoplastů vstřikovaných s nadouvadly [29, 43, 44].

Technologie Intellimold si klade za cíl dosáhnout nově vyvinutými algoritmy řízení vstřikovacího procesu konstantního vnitřního tlaku taveniny v dutině nástroje, kterým zajišťuje konstantní měrný objem v celém výstřiku s minimálním vnitřním pnutím [45].

V poslední řadě je stále se vyvíjející technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. Tato technologie přenáší řízení vstřikovacího procesu z oblasti stroje na samotné vstřikovací nástroje v podobě řízení vstřikovacího procesu regulací tlaku taveniny na tryskách vícevtokového horkého systému vstřikovacího nástroje na základě předem zadaného tlakového profilu pro každou trysku. Patent na tuto technologii v současné době vlastní firma Synventive Molding Solutions, GmbH a technologii uvádí pod názvem Dynamic Feed [46].

Náročné požadavky praxe nevedou jen k vyvíjení nových technologií vstřikování termoplastů, ale i k optimalizaci samotného vstřikovacího stroje. V dnešní době se vedou na evropském kontinentu, kde byly do konce minulého století užívány

výhradně stroje hydraulické, rozsáhlé diskuze o výhodách a nevýhodách elektrických vstřikovacích strojů, které přinášejí vyšší přesnost vstřikovacího procesu, ovšem za cenu vyšších pořizovacích nákladů, nižší životnosti strojů a omezení aplikovatelnosti díky vlastnostem elektrických motorů. Do budoucna se předpokládá, že budou používány stroje hybridní, které využívají předností obou druhů pohonu [30, 31].

1.2 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je analyzování dějů během procesu plnění dutiny vstřikovacího nástroje, především z pohledu tlakových bilancí napříč celým procesem, a rozbor vlivů způsobu řízení procesu na vlastnosti výstřiků a stabilitu procesu.

Jednotlivé cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Teoretický rozbor procesu plnění dutiny nástroje taveninou a vlivu technologických parametrů na proces vstřikování.
2. Teoretický rozbor způsobů řízení vstřikovacího procesu.
3. Vytipování vstřikovacího nástroje a připravení technologie konvenčního kaskádového vstřikování a nové technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje k experimentálním měřením.

Pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování i technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje dále provést analýzu:

4. plnění dutiny vstřikovacího nástroje taveninou,
5. tlakových poměrů napříč procesem,
6. vlivu materiálu na charakteristiku vstřikovacího procesu,
7. vlivu technologie na vlastnosti výstřiků,
8. stability vstřikovacího procesu.
9. Pokud bude dosažena výrobitelnost kvalitních výstřiků novou technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje během experimentálních měření, pak nasadit tuto technologii do skutečného výrobního procesu v praxi a porovnat ji s konvenční technologií kaskádového vstřikování.

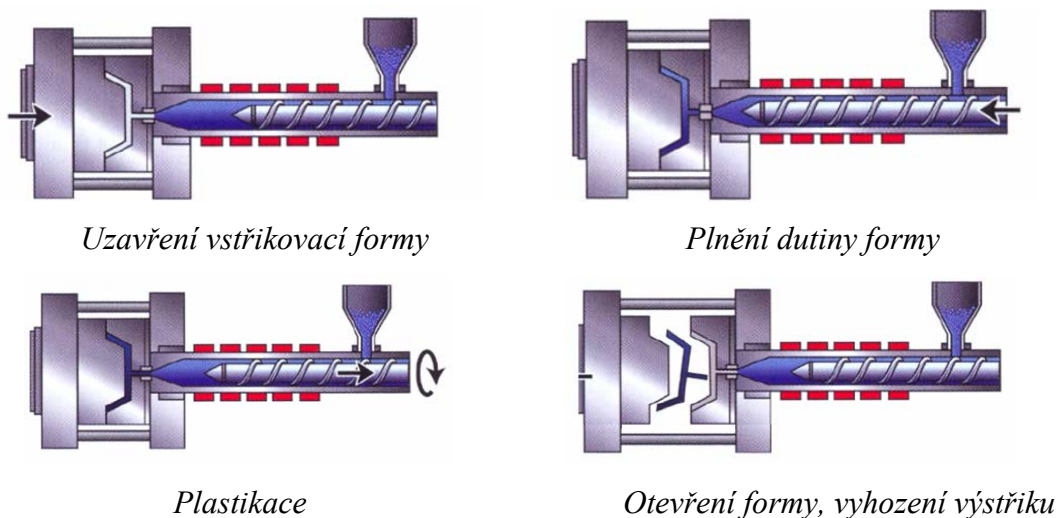
2 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část se zabývá rozбором procesu plnění dutiny nástroje taveninou, vlivy technologických parametrů na technologii vstřikování a porovnáním způsobů řízení vstřikovacího procesu. Závěrem teoretické části je popsán princip technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

2.1 Fáze procesu technologie vstřikování

Vstřikování je cyklický proces, při kterém se dávka roztaveného plastu ze vstřikovací jednotky vstříkne do uzavřené dutiny vstřikovacího nástroje, která má tvar budoucího výrobku. Po vstříknutí se roztavený plast chladí až do jeho ztuhnutí, čímž se vytvoří tuhý výstřik, který je možné z nástroje vyjmout [4].

Počátkem vstřikovacího cyklu je uzavření vstřikovací formy (viz obr. 1). Po uzavření formy uzavírací jednotkou je axiálním pohybem šneku vstříknut natavený plast z komory před čelem šneku v plastikační jednotce do dutiny formy, která je temperována. V okamžiku, kdy je dutina vstřikovacího nástroje zaplněna, působí šnek na materiál dále dotlakem, který vyrovnává smrštění plastu v dutině nástroje. Po dotlaku následuje plastikace nové dávky plastu. Šnek se začne otáčet a současně posouvat směrem od vstřikovací formy. Při tomto pohybu nabírá pod násypkou granulovanou hmotu, plastikuje ji a přes zpětný ventil vtlačuje do prostoru před čelem šneku [4, 8].



Obr. 1. Schéma průběhu vstřikovacího cyklu

2.2 Reologické vlastnosti tavenin plastů

Při plastikaci je plast převeden do viskózně tekutého stavu. Se zvyšující se teplotou taveniny se zmenšuje její viskozita η , která je měřítkem vnitřního odporu materiálu při jeho toku za působení konstantní síly. Tokové vlastnosti tavenin plastů závisí na smykové rychlosti $\dot{\gamma}$, teplotě taveniny T_i a vliv má i tlak taveniny p [13].

Tavenina je během toku plastu v nástroji vystavována smykovému napětí, které je možné popsat tzv. viskózním tokem (viz obr. 2). Tento viskózní tok je způsobený přilnutím taveniny k povrchu stěn nástroje a následným smýkáním jednotlivých vrstev. Výsledkem je viskózní tok se smykovou rychlostí $\dot{\gamma}$ a smykovým napětím τ .

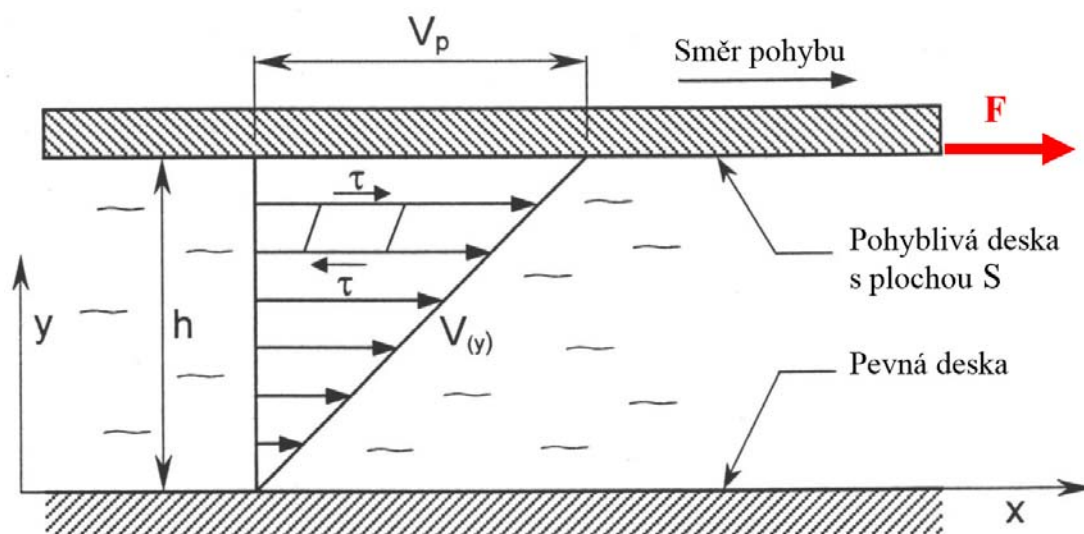
$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} = \frac{v_p}{h} \quad (1)$$

kde v_p je rychlost pohybu krajní vrstvy taveniny,
 h je tloušťka vrstvy tekoucí taveniny plastu.

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (2)$$

kde F je smyková síla,
 S je smyková plocha.

V tomto nejjednodušším případě viskózního toku je smyková rychlost a smykové napětí konstantní a rychlost tečení vzrůstá lineárně s tloušťkou vrstvy tekoucí taveniny plastu [7, 13].



Obr. 2. Viskózní tok

Při stacionárním toku existuje mezi vrstvami tekutiny smykové napětí. Newtonův zákon udává závislost mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí (anebo všeobecně mezi napětím a rychlostí deformace). Smykové napětí je přímo úměrné smykové rychlosti [14]:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

kde τ je smykové napětí,
 η je dynamická viskozita,
 $\dot{\gamma}$ je smyková rychlost.

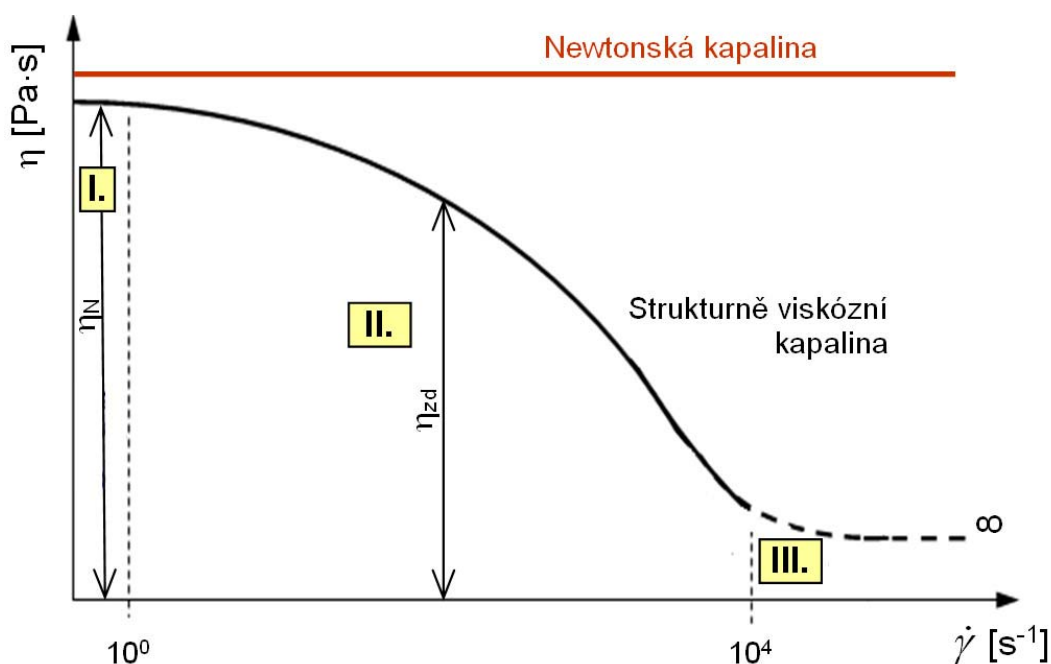
Konstanta úměrnosti η je dynamická viskozita a má rozměr [Pa·s]. Rovnice charakterizuje ideální newtonskou kapalinu, u které je dynamická viskozita při konstantní teplotě nezávislá na smykové rychlosti a mezi smykovým napětím v kapalině a smykovou rychlostí je lineární závislost [13, 15].

Taveniny plastů však patří k nenewtonským kapalinám, jejich viskozita klesá se zvyšujícím se smykovým napětím, a takové kapaliny nazýváme strukturně viskózní nebo také pseudoplastické.

Závislost dynamické viskozity η na smykové rychlosti $\dot{\gamma}$ je možné pro široký rozsah smykových rychlostí vyjádřit graficky tzv. **křivkou viskozity** stanovenou pro konstantní teplotu taveniny (viz obr. 3) a popsat vztahem vycházejícím ze vztahu pro newtonské kapaliny:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad (4) \quad \text{anebo} \quad \eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \neq \text{konst.} \quad (5)$$

Při velmi malých smykových rychlostech, asi do $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$, viskozita na smykové rychlosti nezávisí. Je to oblast takzvané maximální newtonské viskozity η_N , viz oblast I v obr. 3. Při dalším zvýšení smykové rychlosti viskozita klesá se zvyšující se smykovou rychlostí (viz oblast II) a její hodnota je dána podílem aktuálních hodnot smykového napětí τ a smykové rychlosti $\dot{\gamma}$. Označuje se zdánlivá viskozita η_{zd} , přičemž reologické chování tavenin plastu při technologii vstřikování se nachází u horní hranice této oblasti, přibližně mezi hodnotami smykové rychlosti $\dot{\gamma} = 10^3 - 10^4$. Při extrémně vysokých smykových rychlostech se stává viskozita opět nezávislou na smykové rychlosti (viz oblast III). Tato viskozita se nazývá viskozita při nekonečném smyku a značí se η_∞ . V praxi však nelze těchto podmínek dosáhnout [4, 15].



Obr. 3. Závislost dynamické viskozity roztavených polymerů na smykové rychlosti

V oblasti středních a vyšších smykových rychlostí lze závislost smykového napětí na smykové rychlosti popsat mocninovým zákonem ve tvaru:

$$\dot{\gamma} = \Phi \cdot \tau^m \quad (6)$$

kde Φ je koeficient tekutosti a odpovídá smykové rychlosti při zvolené hodnotě smykového napětí a m je exponent mocninového zákona vyjadřující velikost odchylky tokového chování taveniny od chování newtonského [1, 13].

Dynamickou viskozitu taveniny však neovlivňuje pouze smyková rychlost, ale vliv má i teplota a tlak. S rostoucí teplotou taveniny se hodnota zdánlivé dynamické viskozity za konstantní smykové rychlosti snižuje a stejně je tomu i v případě působení tlaku.

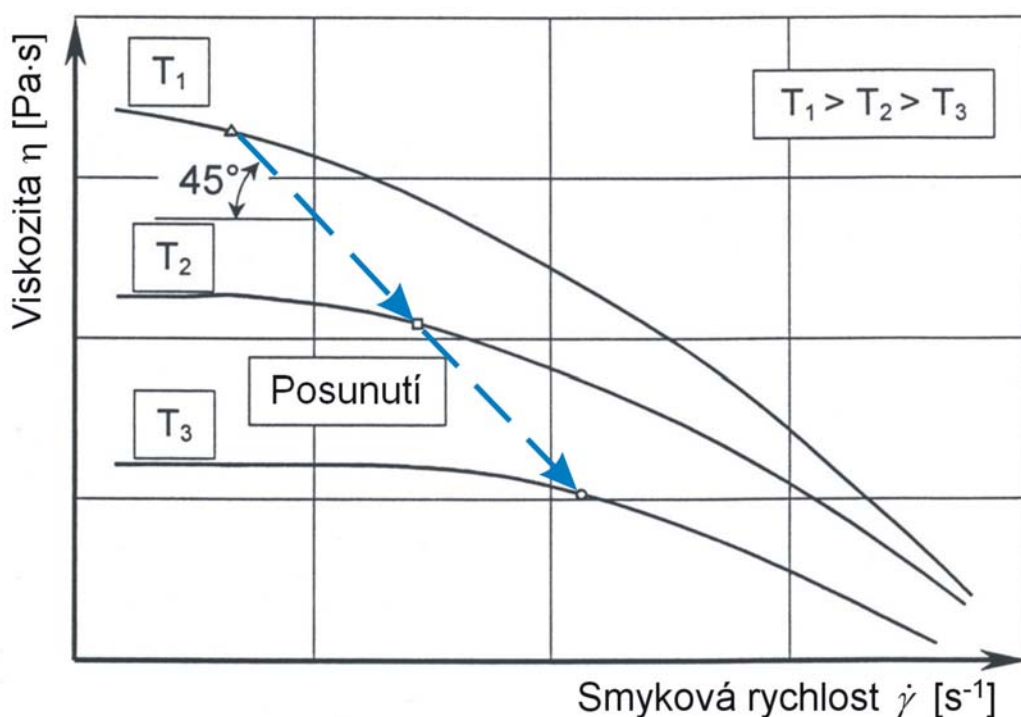
Přibližně lze závislost viskozity taveniny plastů na teplotě popsat Arrheniovou rovnicí (7), vycházející z energetické teorie toku, která má ovšem platnost pouze při vyšších teplotách, kde se chování taveniny blíží chování newtonské kapaliny:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\left(\frac{E}{R_m \cdot T}\right)} \quad (7)$$

kde η je dynamická viskozita, η_0 je hodnota dynamické viskozity při $T = 0K$, E je aktivační energie viskózního toku, R_m je materiálová konstanta analogická plynové konstantě a T je teplota [23].

Z rovnice (7) je zřejmé, že viskozita newtonských kapalin s rostoucí teplotou klesá podle exponenciální funkce. Taveniny plastů se blíží svým chováním newtonským kapalinám pouze při vysokých teplotách.

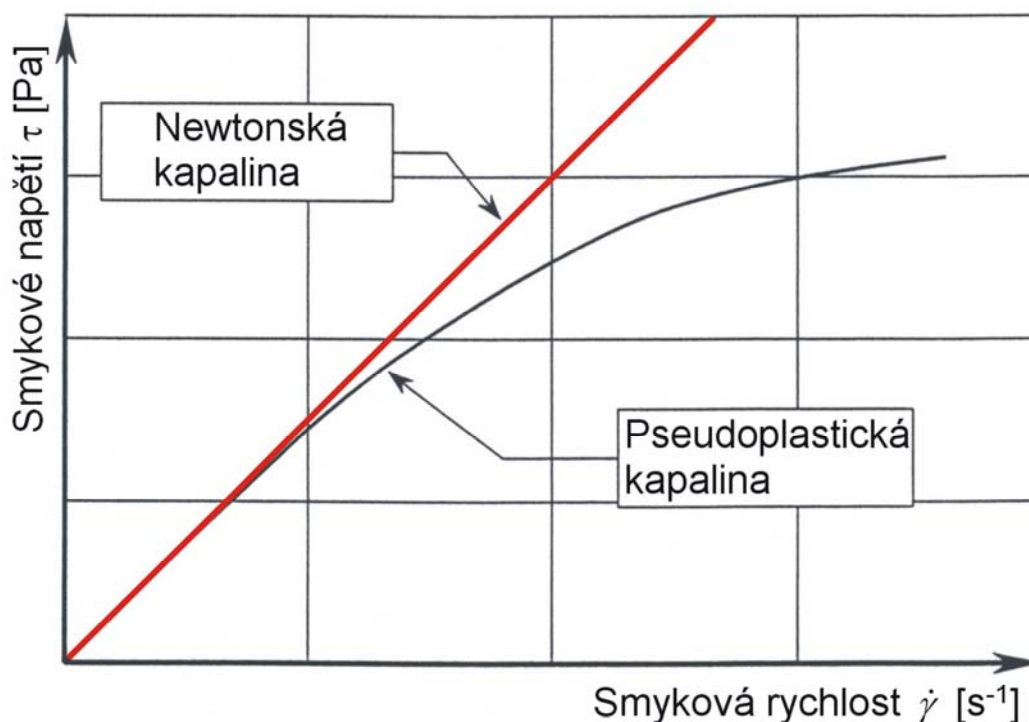
Z grafu křivek viskozit vynesných v logaritmických souřadnicích pro různé teploty taveniny plastu je zřejmé, že i když se poloha křivek s teplotou mění, tvar křivky zůstává stejný (viz obr. 4). Pokud jsou křivky viskozity posunuty podél čar pod úhlem 45° , překrývají se jedna přes druhou. Všechny křivky viskozity mají tvar tzv. generalizované křivky viskozity, která je nezávislá na teplotě. Tento jev se také nazývá princip posunutí teploty [7, 13].



Obr. 4. Vliv teploty na viskozitu plastu, princip posunutí teploty

Závislost smykové rychlosti $\dot{\gamma}$ na smykovém napětí τ stanovené pro konstantní teplotu taveniny zachycují **tokové křivky** (viz obr. 5). Pokud jsou vyneseny závislosti v logaritmických souřadnicích, pak je u newtonských kapalin smykové napětí přímo úměrné smykové rychlosti a toková křivka je přímkou se směrnici rovnou jedné. Toková křivka pseudoplastické kapaliny v logaritmických souřadnicích je charakteristická také přímkou úměrou, ovšem se směrnici rovnou exponentu mocninového zákona m , tedy směrnici větší než jedna, což znamená, že smykové napětí vzrůstá degresivně se smykovou rychlostí. Jestliže se zjišťují tokové vlastnosti při různých teplotách taveniny, jsou přímky v logaritmických souřadnicích

pouze posunuty ve směru osy $\dot{\gamma}$, neboť jejich směrnice m zůstává konstantní. K měření tokových vlastností tavenin plastů se používají kapilární nebo rotační plastometry [4, 13].



Obr. 5. Všeobecné tokové křivky pro newtonské a pseudoplastické kapaliny

2.2.1 Viskoelasticita tavenin plastů

Taveniny polymerů vykazují vždy větší či menší kaučukovitou elasticitu, která se projevuje ve zvětšování rozměrů taveniny po výstupu z trysky. Zvětšování rozměrů představuje určitou energii, kterou je nutno tavenině dodat prostřednictvím tlaku působícího na taveninu [4].

Celkovou energii potřebnou k průchodu taveniny kapilárou je možné rozdělit na několik dějů. Použitý tlakový rozdíl p_c se při toku viskoelastické taveniny kapilárou spotřebuje jednak na vlastní viskózní tok, tedy na vytvoření rychlostního profilu v kapiláře a s tím spojené překonávání viskózních odporů, které se vlivem tření později změní v teplo (p_q), jednak na překonání elastického odporu taveniny při jejím vtlačování do kapiláry a na její vytlačování z kapiláry (p_e), což se projevuje jako kinetická energie vytékající taveniny. To vše je příčinou, že k dosažení určité průtokové objemové rychlosti je nutno vynaložit větší množství práce, a tedy působit

větším tlakem, než jaký by odpovídal samotnému viskóznímu toku v trysce. Tlakovou bilanci lze pak zapsat vztahem:

$$p_c = p_q + p_e \quad (8)$$

Z rovnováhy sil působících na elementární vrstvu ve tvaru válcového pláště v ustáleném stavu je možné odvodit vztah:

$$\tau = \frac{r \cdot p_q}{2 \cdot l} \quad (9)$$

kde r je poloměr kapiláry,
 l je délka kapiláry.

Po dosazení vztahu pro p_q ze vztahu 9 do vztahu 8 získáme závislost:

$$p_c = 2 \cdot \tau \cdot \frac{l}{r} + p_e \quad (10)$$

Bylo zjištěno, že p_e nezávisí na délce kapiláry, p_q však s její délkou roste. Na tomto zjištění je založeno stanovení p_e , tzv. Bagleyho korekce [2, 4, 23].

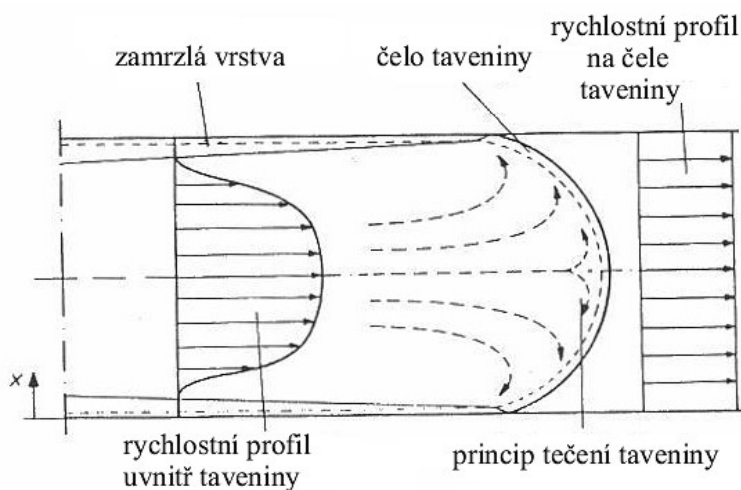
Měřením dvojlomu byla získána představa o velikosti elastické deformace taveniny v kapiláře. Bylo zjištěno, že dvojlom (tedy také elastická deformace) se projevuje již v zásobníku nad tryskou a maxima dosahuje ve vstupu do kapiláry. Za vstupem dvojlom klesá, což ukazuje na zmenšení elastické deformace a na jistou relaxaci. Po výstupu z kapiláry tavenina „narůstá“, vytlačovaný profil má větší průměr než kapilára. Narůstání je v podstatě způsobeno elastickým zotavením po skončení toku, uvolněním elastické deformace energie obsažené v tavenině [4, 23].

2.3 Proces plnění dutiny vstřikovacího nástroje

Plnění dutiny formy je provázáno rychlými změnami tlaku, teploty a viskozity taveniny. Vlastní proces plnění dutiny formy rozhoduje o vlastnostech budoucího výrobku. U technologie vstřikování je vyžadováno plnění dutiny taveninou laminárním tokem (viz obr. 6).

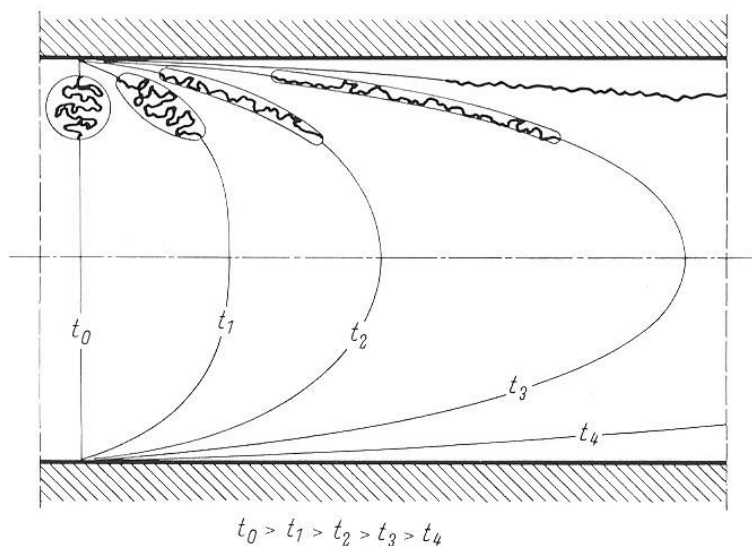
Tavenina při styku s formou okamžitě tuhne a vytvoří vrstvu nepohyblivé hmoty a zároveň tepelné izolace. Uvnitř je potom plastické jádro s nízkou viskozitou, umožňující další průtok taveniny plastu do dutiny formy, která se následně roztéká směrem ke stěnám, až dojde k zaplnění tvarové dutiny formy. Zvyšování viskozity

směrem od středu tvarové dutiny ke stěnám se projevuje na vyšší rychlosti



Obr. 6. Laminární tok taveniny

Doba **fáze vstřiku** se odvíjí od technologických podmínek vstřikování, a to zejména od teploty taveniny a vstřikovací rychlosti. Vliv má ovšem i druh plastu, konstrukce vtokového systému a další faktory. S rostoucí vstřikovací rychlostí a tlakem se zvyšuje orientace makromolekul (viz obr. 7) a vláknitého plniva. Nadměrná orientace makromolekul způsobuje vnitřní pnutí, které ve výrobku



Obr. 7. Orientace makromolekul v průběhu plnění dutiny formy

zahřívá a může způsobit až spálení plastu, tzv. diesel efekt. Doba plnění dutiny formy má být co nejkratší, protože vstřikovaná tavenina se stykem s chlazenou

v plastickém jádru a výsledkem je zakřivení čela taveniny. Tlak potom klesá směrem ke stěně formy [5, 17].

Proces plnění dutiny je možné rozdělit na dvě fáze, a to fázi vstřikovací a fázi dotlakovou.

nepříznivě ovlivňuje pevnostní a deformační chování.

Další vadou, způsobenou vysokou vstřikovací rychlostí, je uzavírání vzduchu v zadních pozicích formy. Vzduch nestihne uniknout

odvzdušňovacími kanály, vlivem vysokého tlaku se

formou ochlazuje, ztrácí tekutost, resp. roste její viskozita, a při neúměrném prodlužování doby plnění vznikají nedostříknuté zmetky [4, 17].

Po vstřikovací fázi následuje **fáze dotlaková**, která je nezbytná pro kompenzaci objemových změn způsobených chladnutím taveniny ve formě tlakem nižším, než byl tlak taveniny ve vstřikovací fázi.

Pokud by fáze vstřiku pokračovala i po zaplnění dutiny nástroje, došlo by k stlačování hmoty v nástroji, které by se projevilo prudkým nárůstem tlaku uvnitř nástroje a náhlým poklesem rychlosti vstřikování.

Okamžik přepnutí na dotlakovou fázi je tedy velmi významný a má vliv na vlastnosti výstřiku. Pozdní přepnutí na dotlak by vedlo k nárůstu hmotnosti, rozměrů výstřiku a zvýšenému vnitřnímu pnutí ve výrobku [4, 5, 8].

2.4 Tlakové poměry při procesu vstřikování plastů

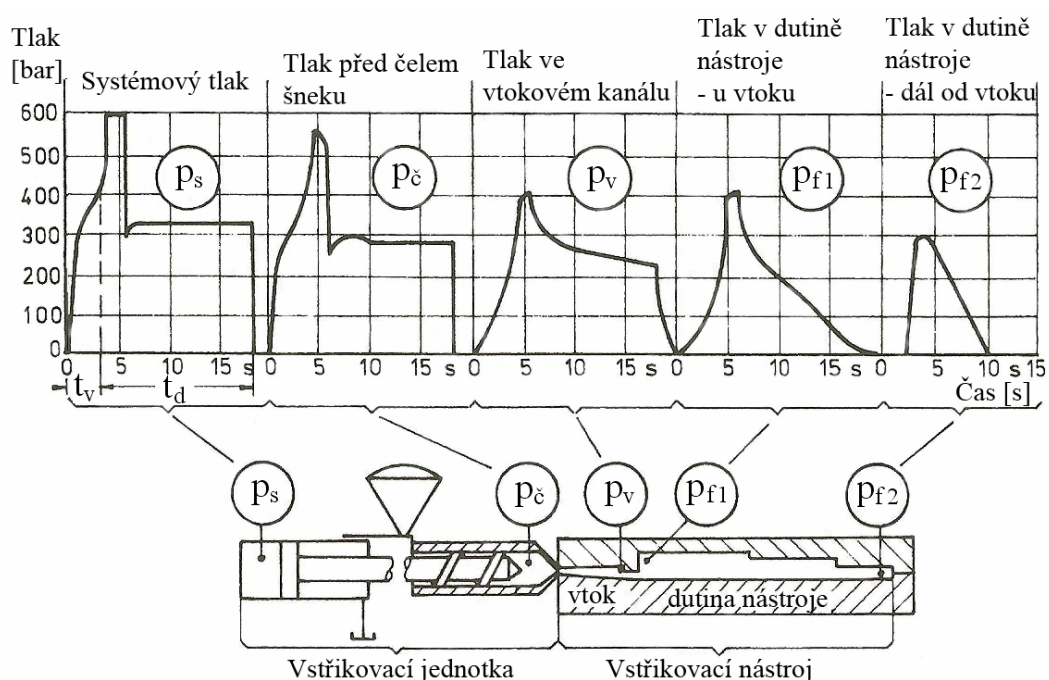
Průběhy tlaků v závislosti na čase zaznamenané napříč vstřikovacím procesem nejsou stejné a vykazují při porovnání značné rozdíly (viz obr. 8). Liší se od sebe nejen průběh tlaku v hydraulické jednotce p_s (tlak systémový) a tlaku ve vstřikovací jednotce před čelem šneku p_c (tlak specifický), ale odlišné jsou i průběhy tlaků v dutině nástroje p_{f1} , p_{f2} (vnitřní tlaky) a ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje p_v .

Průběh systémového tlaku je možné rozdělit na dvě výrazné fáze, a to na fázi vstřikovací trvající dobu t_v a dotlakovou po čas t_d .

U vtokového ústí v dutině nástroje je průběh tlaku p_{f1} značně rozdílný od tlakového průběhu v hydraulické jednotce p_s . Rychlost pohybu šneku vpřed neodpovídá, především vlivem stlačitelnosti taveniny, plně rychlosti tečení taveniny, a to je důvod, proč již ve vstřikovací fázi dochází k rozdílným zmiňovaným tlakovým průběhům, a to nejen ve výši tlaku, ale i v čase. Do vstřikovacího nástroje přichází tlak zpožděný a redukovaný p_v , p_{f1} , p_{f2} v porovnání s tlakem systémovým, přičemž i tyto tlaky v různých místech nástroje se navzájem liší.

Ve fázi chlazení tlak v dutině nástroje klesá. Jakmile skončí fáze dotlaku a nebo zatuhne vtokové ústí, tlak v dutině nástroje prudce klesne, neboť tavenina ze vstřikovací jednotky již nepůsobí na plast v dutině nástroje.

Toto naznačuje, že plast je vystavován v různých místech různým tlakovým poměrům, a to je jeden z důvodů vzniku vnitřních pnutí ve výrobku [1, 5, 13].



Obr. 8. Tlakové poměry během procesu vstřikování plastů

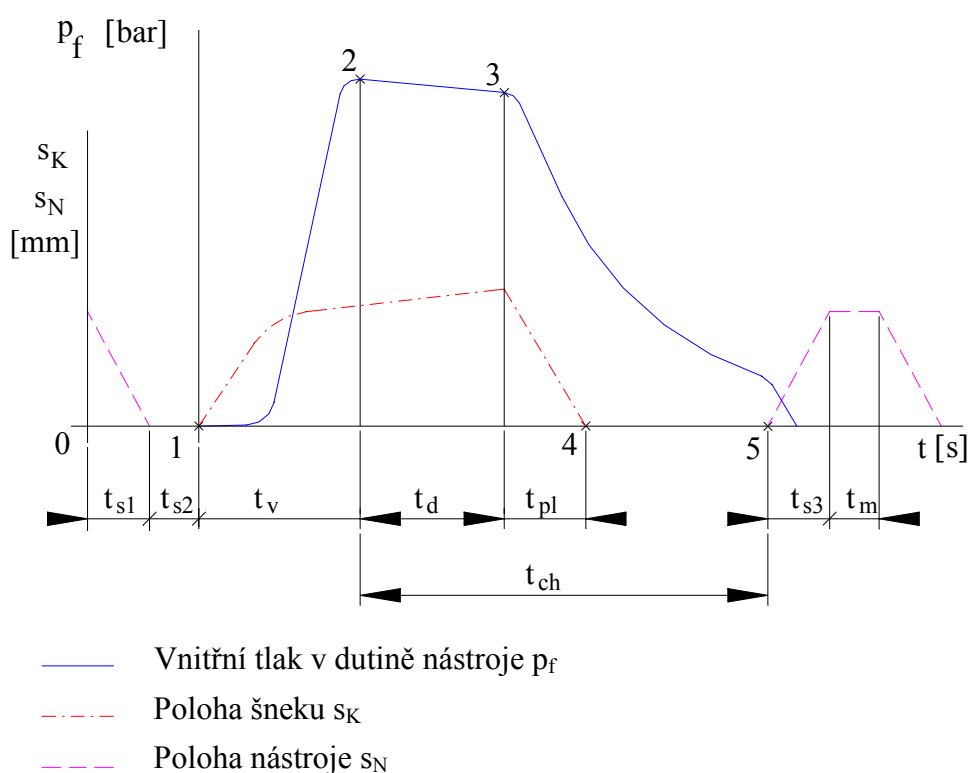
2.4.1 Průběh tlaku v dutině nástroje během vstřikovacího cyklu

Na vstřikovací stroj neustále působí různé účinky okolí a z procesu. Důsledkem je kolísání teploty, tlaku i času během vstřikovacích cyklů. Vzhledem ke kolísání parametrů vstřikovacího procesu je výhodné analyzovat tlak uvnitř dutiny nástroje, pomocí kterého je možné optimálně regulovat technologické parametry a zaznamenat nežádoucí změny procesu během produkce [1].

Tlak v dutině nástroje je ovlivněn působením vstřikovacího stroje na taveninu plastu a není během plnění konstantní. Průběh tlaku v dutině nástroje v závislosti na čase znázorňuje obrázek 9. Za začátek vstřikovacího procesu je možné označit impuls k uzavření vstřikovacího nástroje. Čas potřebný pro uzavření nástroje je označen t_{s1} . Na nástroj je působeno uzavírací silou, kterou je třeba vyvodit pro zaručení nepootevření vstřikovací formy při plnění a dotlaku. Paralelně či následně po t_{s1} probíhá přísun vstřikovací jednotky ke vstřikovacím nástroji v čase t_{s2} . Tento pohyb vstřikovací jednotky není vždy používán ve vstřikovacím cyklu a zejména při použití vtokové soustavy s uzavíracími tryskami se téměř nevyskytuje.

V bodě **I** začíná vlastní vstřik taveniny ze vstřikovací jednotky stroje do dutiny vstřikovacího nástroje. Čas t_v se nazývá čas vstřiku. Dochází k axiálnímu pohybu šneku a k nárůstu tlaku v dutině formy. Změnou technologických parametrů,

jako je teplota taveniny, teplota formy, vnitřní tlak ve formě a rychlost vstřikování, lze ovlivňovat vlastnosti výstřiku: nejčastěji orientaci makromolekul, pevnost, rázovou houževnatost, vzhled a vlastnosti povrchu, rozměry a hmotnost výstřiku. Vlivem smykové rychlosti čela proudu taveniny se může vyskytnout zvýšení teploty taveniny až o několik desítek °C oproti teplotě ve vstupní zóně vtokové soustavy. Značné zvýšení teploty taveniny je často možné zaznamenat u horkých vtokových systémů. Vstřikovací fáze je ukončena v bodě 2, kde je dosaženo maximální hodnoty tlaku v dutině nástroje.



Obr. 9. Průběh tlaku v dutině formy během vstřikovacího cyklu

Následným časovým úsekem je čas t_{ch} , čas chlazení, který probíhá až do otevření formy. Je nutno podotknout, že ochlazování taveniny nastává vlastně již při kontaktu taveniny se stěnou vstřikovací formy, tedy již v době vstřiku t_v .

Časový úsek t_d označující dobu dotlaku zabezpečuje vyrovnání objemového smrštění plastu v dutině formy přiváděním taveniny. Doba dotlaku končí v bodě 3. Průběh tlaku během doby dotlaku má značný vliv na rozměry a hmotnost výstřiku, tvorbu propadlin a vnitřních dutin.

Po ukončení doby dotlaku dochází k poklesu tlaku v důsledku smrštění a odlehnutí výstřiku od stěn formy. Vstřikovací jednotka začíná plastikovat novou dávku plastu, čas t_{pl} . Šnek se začne otáčet a zároveň se posouvá dozadu. Teplo potřebné pro plastikaci je předáváno ze stěn válce, které jsou vytápěny zvenčí odporovými pásy. Dále pak vzniká potřebné teplo téměř ze dvou třetin třením plastu o stěnu válce, třením o plochu šneku a vzájemným třením plastu. Plastikace je ukončena v bodě 4, kdy se zastaví rotační pohyb šneku. V určitých případech dochází dále k odsunutí tavicí komory od formy, které zaručuje, že nedojde k nežádoucímu přestupu tepla do chladnoucího výstřiku a že se nebude ochlazovat tryska tavicí komory.

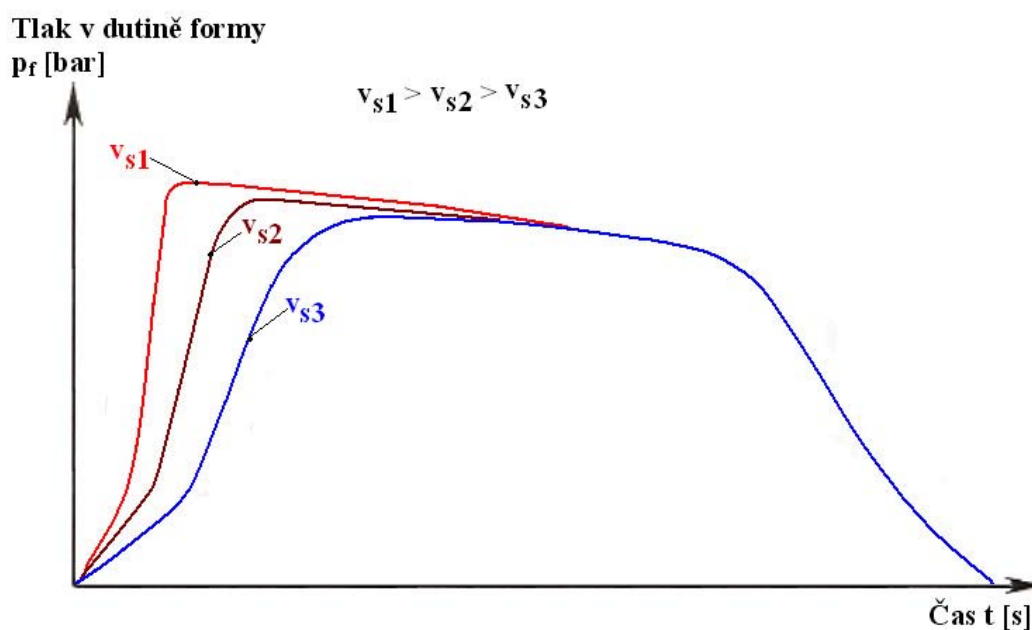
Doba t_{s3} začínající v bodě 5 je strojní doba potřebná k otevření formy po zchladnutí plastu v dutině nástroje. Cyklus je zakončen vyjmutím výstřiku v časovém úseku t_m [3, 4, 5, 6].

2.4.2 Vliv vybraných technologických parametrů na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje

Na výsledný průběh tlaku v dutině formy má zásadní vliv nastavení jednotlivých technologických parametrů. Přestože každý technologický parametr se na výsledném průběhu tlaku uvnitř dutiny formy projevuje jiným způsobem, není zcela jednoznačné, který z parametrů má na průběh tlaku v dutině nástroje největší vliv, a často mají změny jednotlivých parametrů navzájem protichůdné účinky. Nejvýznamnějšími z těchto parametrů jsou *vstřikovací rychlost*, *okamžik přepnutí na dotlak*, *doba dotlaku*, *vstřikovací teplota taveniny* a *teplota formy*. Na průběh tlaku v dutině nástroje má vliv i *umístění tlakového snímače* [3, 6, 7].

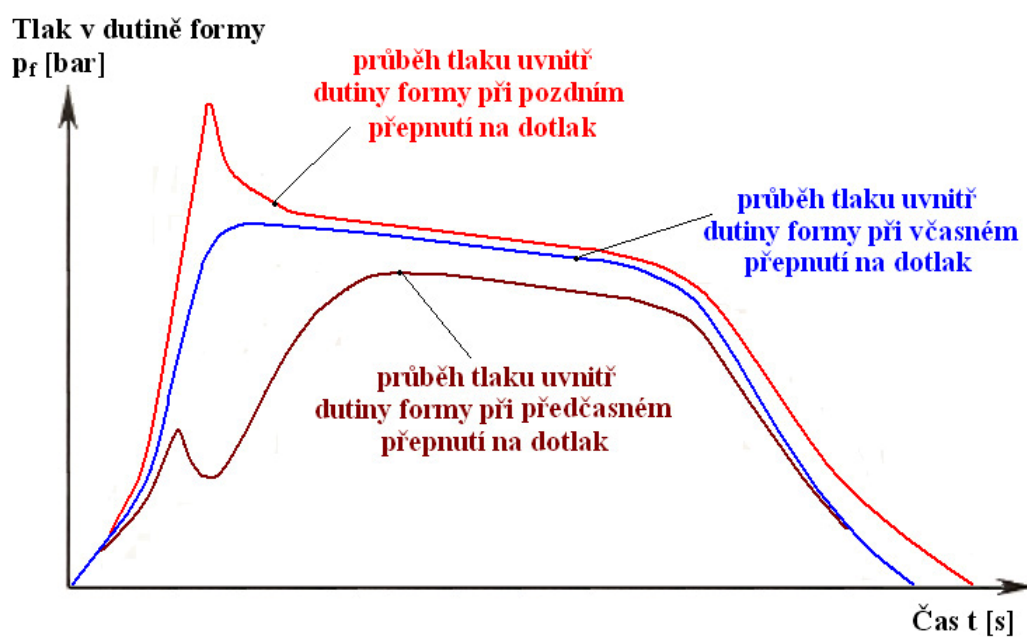
Významný vliv na vlastnosti a kvalitu výstřiku má doba, za kterou je dutina formy naplněna. Tuto dobu lze ovlivnit především vstřikovací rychlostí. Na obrázku 10 je znázorněn průběh tlaku uvnitř dutiny formy v závislosti na velikosti vstřikovací rychlosti. Čím je vstřikovací rychlost vyšší, tím je nárůst tlaku ve fázi vstřikování prudší. V dotlakové fázi se změna vstřikovací rychlosti neprojevuje [1, 7, 19].

Během plnění dutiny plastem následuje po vstřikovací fázi fáze dotlaková. Okamžik přepnutí mezi těmito fázemi je velice důležitý z pohledu procesu plnění dutiny a je možné jej řídit podle dráhy šneku, času, hydraulického tlaku vstřikovacího stroje, tlaku v dutině formy, podle tlaku taveniny na trysce vstřikovacího stroje, podle pootevření nástroje a podle teploty dutiny nástroje.



Obr. 10. Vliv vstřikovací rychlosti na průběh tlaku uvnitř dutiny formy

V praxi se nejčastěji používá přepnutí na dotlak podle dráhy šneku, ke kterému dojde, jakmile šnek dosáhne určité polohy během vstřikování. Méně se pak využívá přepnutí podle času a podle vnitřního tlaku v dutině. Přepnutí na dotlak pomocí pootevření nástroje se v praxi téměř nevyskytuje [7].



Obr. 11. Vliv momentu přepnutí na dotlak na průběh tlaku uvnitř dutiny formy

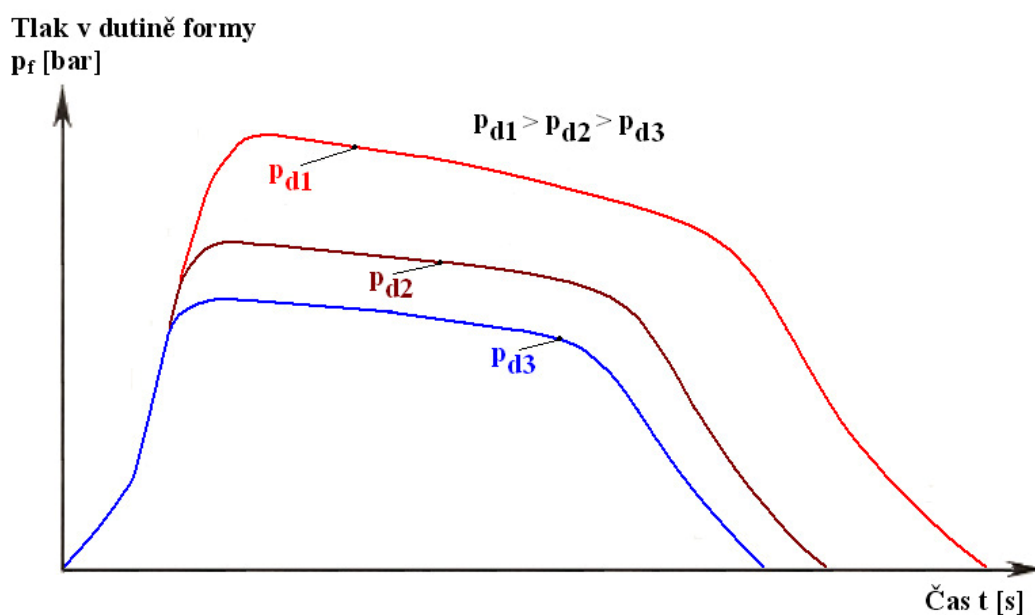
Přepnutí podle tlaku v dutině formy je využíváno především tehdy, jsou-li kladeny vysoké nároky na přesnost výstřiků a vstřikovací jednotka je již částečně opotřebovaná.

Moment přepnutí na dotlakovou fázi (viz obr. 11) má vliv na množství vstříknuté taveniny plastu. Měl by teoreticky nastat až ve chvíli, kdy je dutina formy zcela zaplněna.

Optimální nastavení přepnutí se projevuje plynulým přechodem tlaku ze vstřikovací do dotlakové fáze, a zabraňuje tak tlakovým špičkám, které mohou vznikat na konci vstřikovací fáze.

Při pozdním přepnutí dochází k prudkému zvýšení tlaku ve formě. Tlaková špička způsobí zvýšenou hmotnost, zvětšení rozměrů výstřiku a též zvýšené namáhání formy, které by mohlo vést až k jejímu pružnému prohnutí (tzv. dýchnutí formy) a z toho plynoucí přeplnění formy [24]. Výstřik je po dýchnutí pružně stlačen, po vyjmutí z formy nepatrně expanduje a v jeho povrchových vrstvách vznikne tahové vnitřní pnutí. Je-li přepnutí na dotlak předčasné, dojde k poklesu tlaku v dutině formy a může dojít vlivem dalšího plnění dutiny pouze fází dotlaku k nedotečení taveniny do vzdálených a složitých míst ve formě a výsledkem je neúplný výstřik [6, 18, 19].

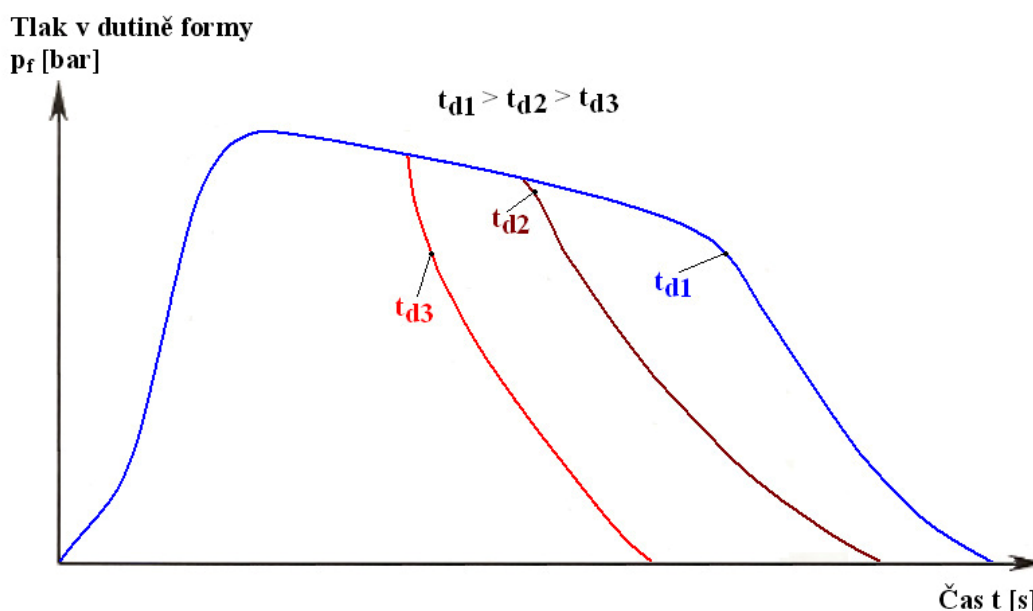
Velikost dotlaku (viz obr. 12) má velký vliv na průběh tlaku uvnitř dutiny formy. Dotlak začíná momentem přepnutí vstřikovací fáze na fázi dotlakovou a trvá



Obr. 12. Vliv velikosti dotlaku na průběh tlaku uvnitř dutiny formy

až do chvíle ukončení působení tlaku vyvozeného strojem. Vyšší dotlak způsobuje nárůst tlaku uvnitř dutiny formy a prodloužení vstřikovacího cyklu. S rostoucí velikostí dotlaku roste i hmotnost výstřiku, klesá smrštění. Výstřiky ovšem vykazují vysoké vnitřní pnutí. Naopak nízký dotlak je příčinou propadlin na výstřiku [3, 19].

Změna **doby dotlaku** (viz obr. 13) ovlivňuje křivku průběhu tlaku uvnitř dutiny formy jen do momentu zatuhnutí vtoku, který zabraňuje přístupu další taveniny do dutiny formy. Pokud je doba dotlaku příliš krátká, vtok nestihne dostatečně ztuhnout a tavenina vytéká z dutiny formy zpět do vtokového systému, není-li vtokový systém vybaven uzavíratelnými tryskami. To vede k dodatečné orientaci makromolekul a kolísání hmotnosti výstřiků nebo k vytváření vzhledových vad [7, 19].

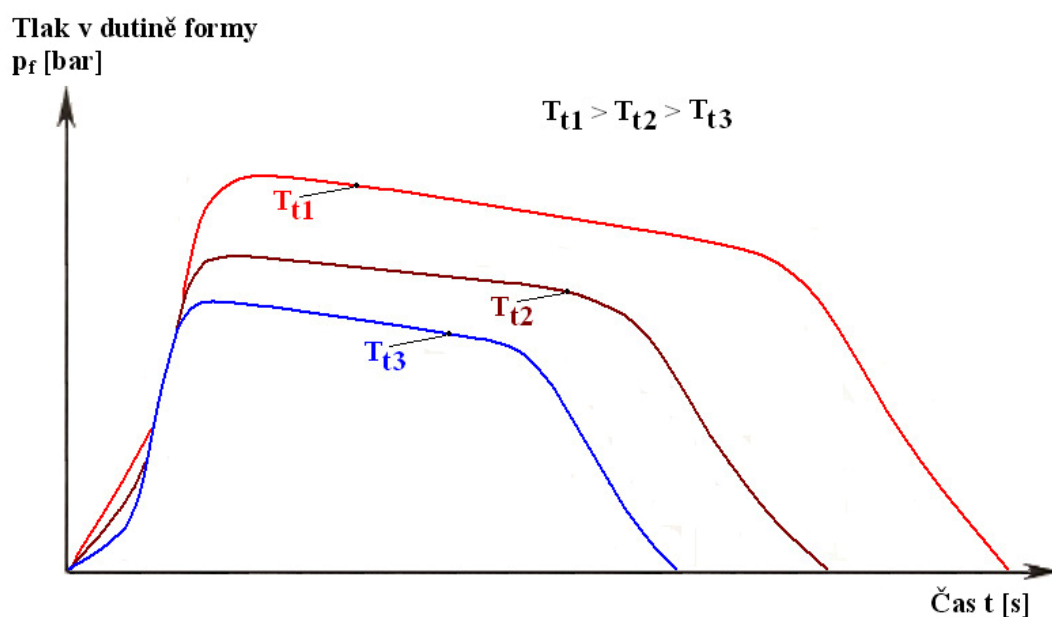


Obr. 13. Vliv doby působení dotlaku na průběh tlaku uvnitř dutiny formy

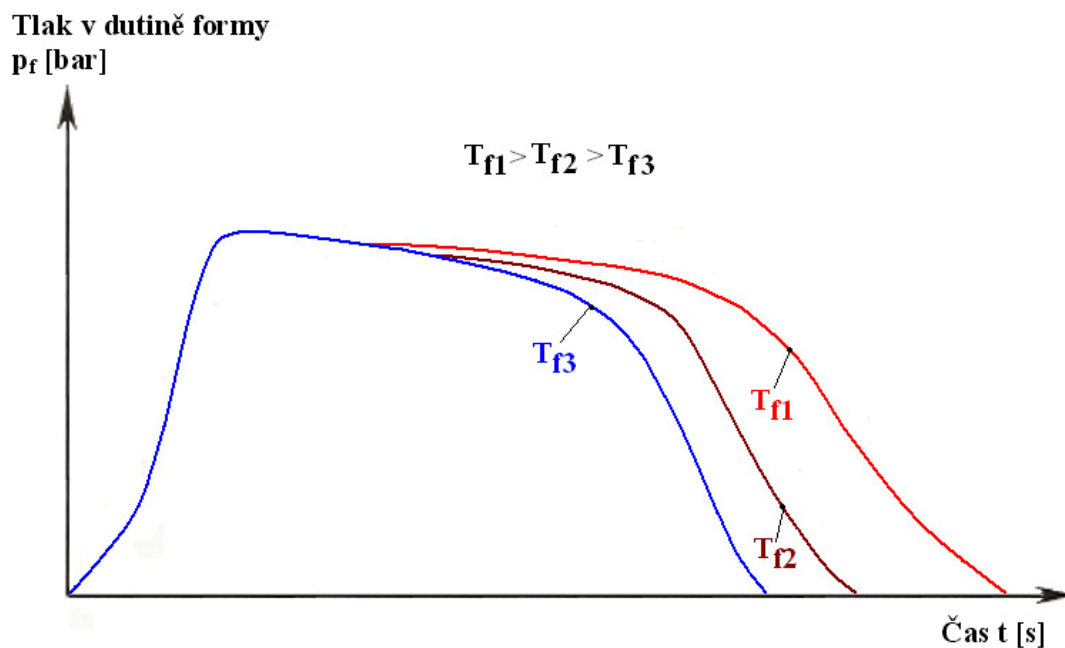
Změna teploty taveniny (viz obr. 14) má výrazný vliv na její viskozitu. Vyšší teplota taveniny zapříčiňuje snížení viskozity taveniny a u vstřikovacího procesu řízeného pomocí systémového tlaku dochází k nárůstu tlaku uvnitř vstřikovací formy. S teplotou taveniny roste i doba chladnutí, což má za následek prodloužení vstřikovacího cyklu. Dále se prodlužuje doba zatuhnutí vtoku, a je proto potřeba i prodloužení doby dotlaku [6, 7, 19].

Teplota formy (viz obr. 15) má značný vliv na kvalitu výstřiků jak z hlediska mechanických vlastností, tak i z hlediska kvality povrchu a rozměrové přesnosti

výstřiků. Velikost teploty formy je důležitá především v dotlakové fázi, kdy silně ovlivňuje rychlost chladnutí taveniny plastu. Vyšší teplota formy způsobuje mírné zvýšení tlaku v dotlakové fázi a pomalejší chladnutí výstřiku, což opět vede k prodloužení vstřikovacího cyklu. U výstřiků s rostoucí teplotou formy klesá vnitřní pnutí, ale zvyšuje se riziko nežádoucích deformací povrchu vlivem smrštění [6, 19].

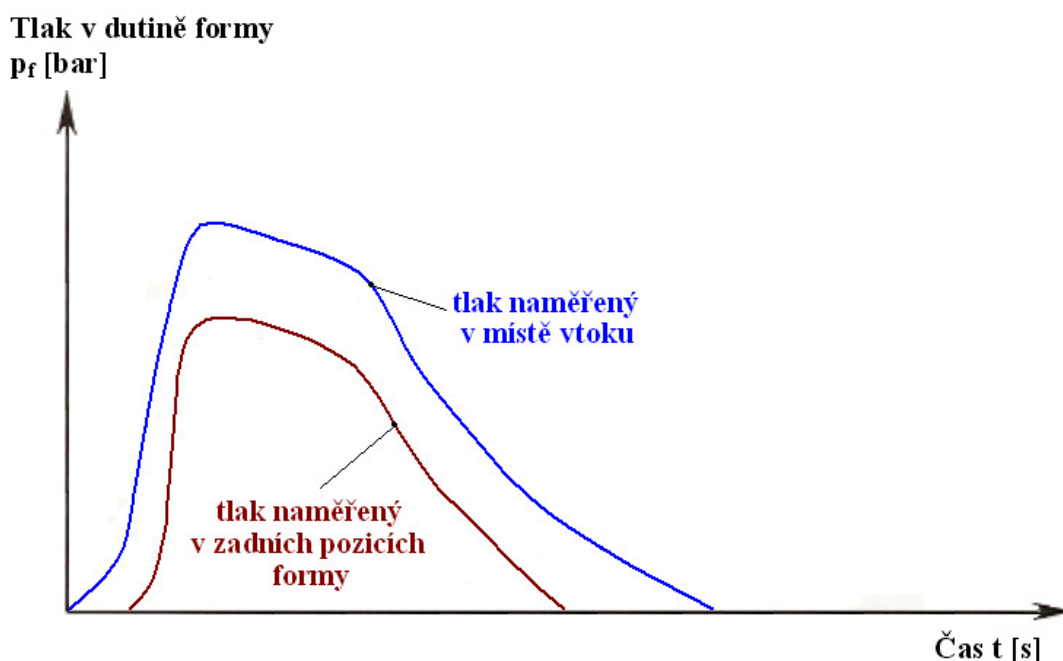


Obr. 14. Vliv teploty taveniny na průběh tlaku uvnitř dutiny formy



Obr. 15. Vliv teploty formy na průběh tlaku uvnitř dutiny formy

Tvar křivky průběhu tlaku v dutině formy a dosažené maximum je závislé také na **umístění tlakového snímače** (viz obr. 16). Nejvyšší hodnoty tlaku uvnitř dutiny formy je možno naměřit v místě ústí vtoku. Ve vzdálenějších pozicích od vtoku tlak nedosahuje výše tlaku u vtoku a jeho časový průběh je kratší. Z hlediska řízení přepnutí na dotlakovou fázi v závislosti na tlaku v dutině nástroje je nejvýhodnější umístění tlakového snímače mimo oblast vtoku, do středu výstřiku [1, 7, 19].



Obr. 16. Vliv umístění tlakového senzoru na průběh tlaku uvnitř dutiny formy

2.5 Diagram p-v-T

Během procesu vstřikování plastů nedochází pouze ke změnám tlaku p , ale i změnám teploty T a měrného objemu v polymeru. Závislost těchto stavových veličin zachycuje p-v-T diagram, přičemž každý plastický materiál je charakterizován svým specifickým p-v-T diagramem. Diagram p-v-T je běžně zobrazován ve dvojrozměrném formátu, kde měrný objem je funkcí teploty při různých konstantních hodnotách tlaků.

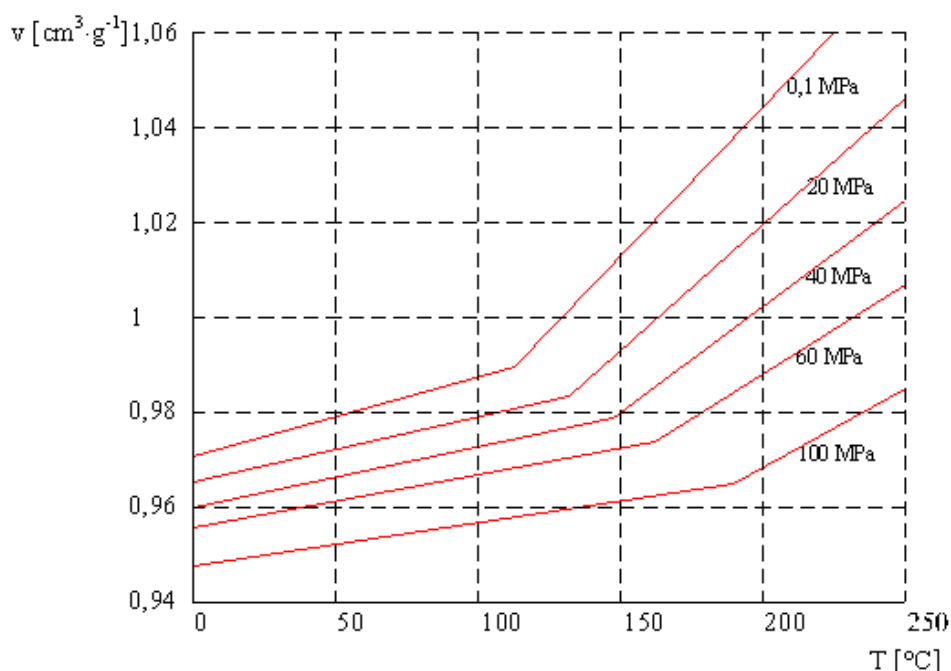
K výpočtům závislosti měrného objemu na teplotě a tlaku lze použít stavové rovnice. Nejznámější je **van der Waalsova rovnice** ve tvaru:

$$(p + \pi) \cdot (v - \omega) = R_m \cdot T \quad (11)$$

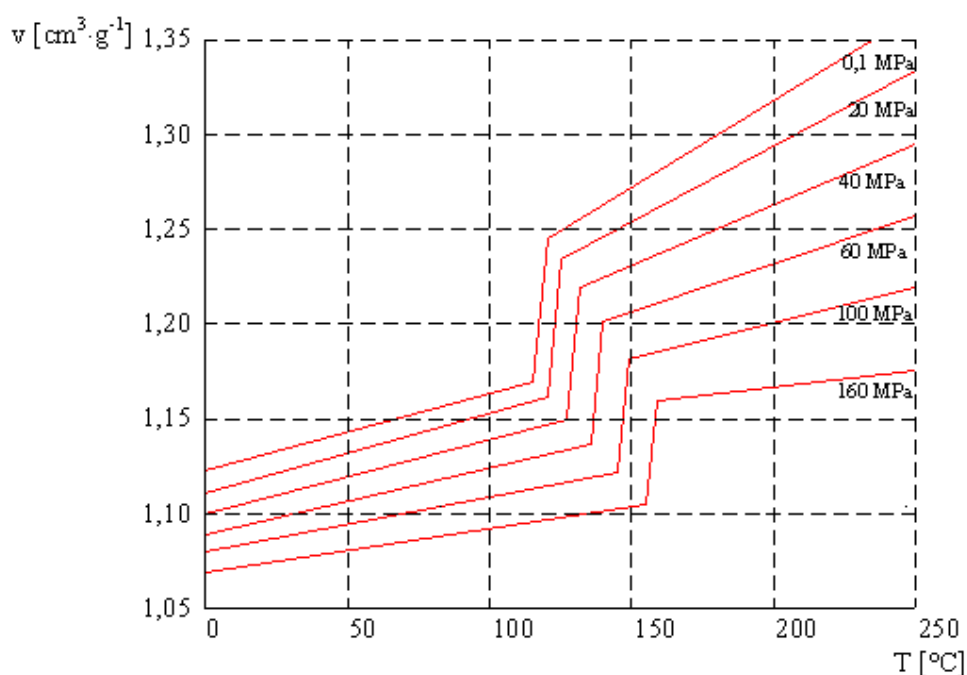
kde p je vnější tlak, π vnitřní tlak vznikající jako důsledek vnitřních sil ve hmotě, v měrný objem polymeru, ω měrný objem polymeru při 0 K, T teplota, R_m materiálová konstanta polymeru analogická plynové konstantě [4, 16].

V souřadnicích *měrný objem – teplota* jsou křivky konstantního tlaku přímky. Směrnice přímky však nemají vlivem skokově se měnících vlastností polymerů v závislosti na teplotě stejnou hodnotu pro všechny teploty a izobarické přímky vykazují zlomy. Tyto zlomy jsou vázány na přechodové teploty polymerů, v důsledku toho mají konstanty R , ω a π jiné hodnoty v závislosti na tom, ve které oblasti vymezené přechodovými teplotami se teplota polymeru aktuálně nachází. Na základě odlišného vlivu teploty na vlastnosti amorfních a semikrystalických polymerů se od sebe liší i příslušné p - v - T diagramy [4, 25].

Diagramy p - v - T pro amorfní (viz obr. 17) i semikrystalické (viz obr. 18) polymery vykazují růst měrného objemu s rostoucí teplotou v důsledku teplotní roztažnosti a pokles měrného objemu s rostoucím tlakem (při konstantní teplotě) z důvodu stlačitelnosti plastů.



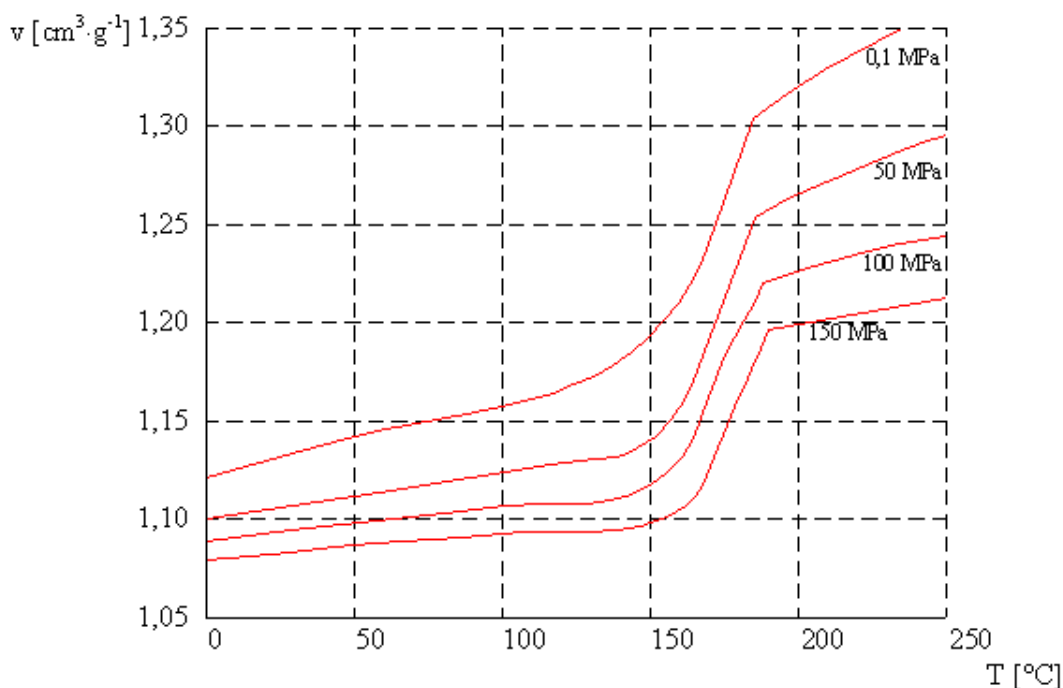
Obr. 17. Diagram p - v - T pro amorfní plast polystyren



Obr. 18. Diagram p - v - T pro semikrystalický plast polypropylen

Semikrystalické plasty vykazují oproti amorfním plastům skokovou změnu měrného objemu při jejich přechodové teplotě nazývané teplota tání [4].

Van der Wallsova stavová rovnice zcela přesně nezachycuje chování plastů, neboť izobary v souřadnicích *měrný objem - teplota* mají tvar přímek, které se ostře



Obr. 19. Diagram p - v - T pro polypropylen vycházející z Taitovy rovnice

lámou v oblastech přechodových teplot. Pro bližší přiblížení se realitě je v dnešní době používanější především pro výpočty simulačních programů modifikovaná **Taitova rovnice**. Při použití Taitovy rovnice jsou přímky izobar mírně zaobleny tak, aby se co nejvíce blížily skutečnosti. U semikrystalických plastů jsou navíc ostré zlomy izobar na spodní hranici oblasti krystalizace nahrazeny exponenciálními křivkami, jak je to vyobrazeno na obr. 19.

Taitova rovnice obsahuje množství konstant specifických pro konkrétní materiál a má dosti komplikovaný tvar:

$$v(T, p) = v_0(T) \left\{ 1 - C \cdot \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + v_1(T, p) \quad (12)$$

přičemž platí následující vztahy:

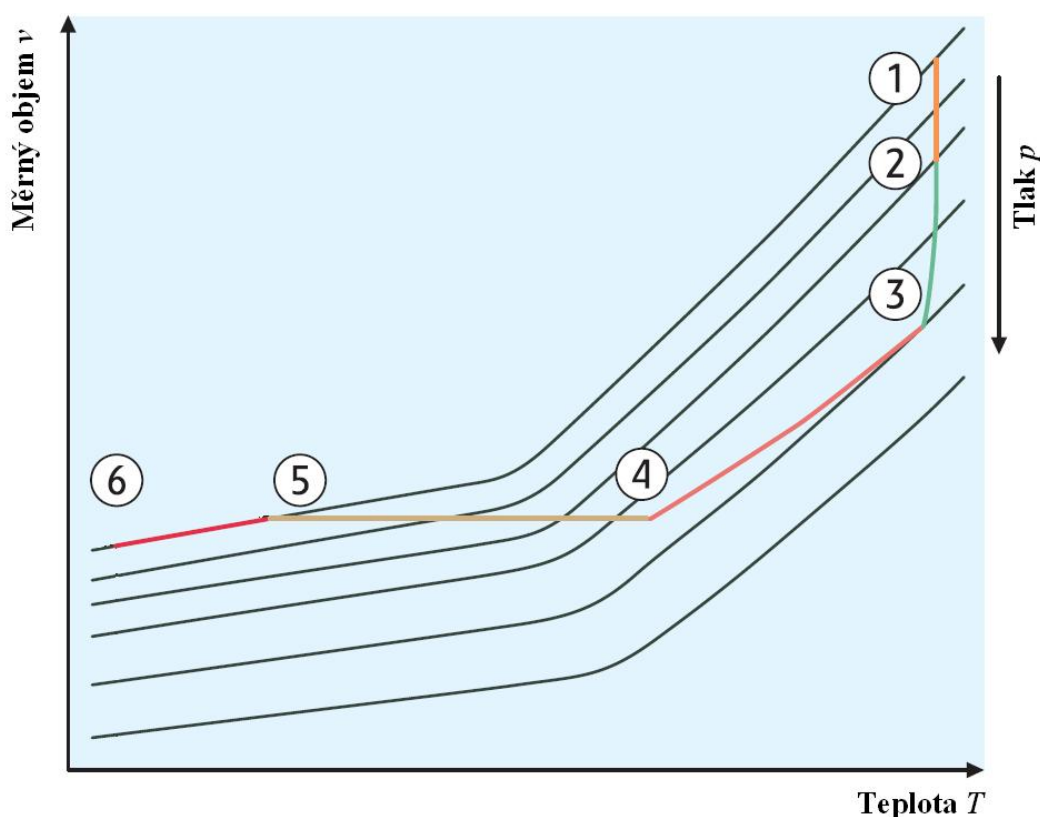
$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{pro } T > T_{př} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3s} \cdot e^{-b_{4s} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= b_7 \cdot e^{(b_8 \cdot \bar{T} - b_9 \cdot p)} \end{aligned} \right\} \text{pro } T < T_{př} \quad (14)$$

kde p značí tlak, v měrný objem polymeru, T je teplota, $T_{př} = b_5 + b_6 \cdot p$ je přechodová teplota charakteristická pro daný plast, $\bar{T} = T - b_5$, $C = 0,0894$ je univerzální konstanta a b_i jsou materiálové konstanty pro daný polymer [16, 24, 26].

2.5.1 Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T

Vynesením vstřikovacího cyklu do p-v-T diagramu získáme uzavřený obrazec, jak je patrné z obr. 20. V tomto případě se jedná o p-v-T diagram pro amorfní plast. Průběh diagramu je výrazně jednodušší než v případě semikrystalického plastu, který byl použit v experimentálních měřeních, nicméně pro ilustraci a vysvětlení dostatečně vyhovuje.



Obr. 20. Vstřikovací cyklus v p - v - T diagramu

Plast je izobaricky zahříván z bodu 6 do bodu 1, kde se nachází již v podobě taveniny. Během vstřikovací fáze 1-3 stoupá tlak taveniny. Vstřikovací fáze je rozdělena bodem 2, který představuje okamžik objemového vyplnění dutiny nástroje při téměř konstantní teplotě. Dále následuje komprese taveniny v dutině nástroje 2-3, vyskytující se u určitých postupů technologie vstřikování. Na konci vstřikovací fáze v bodě 3 začíná fáze dotlaku vyrovnávající termickou kontrakci roztaveného plastu, tedy zmenšování objemu taveniny v dutině nástroje v důsledku chlazení. Po zatuhnutí vtoku v bodě 4 dochází k izochorickému poklesu tlaku až na tlak okolí 5. Z bodu 5 do bodu 6 pak klesá teplota výstřiku na teplotu okolí [4, 16].

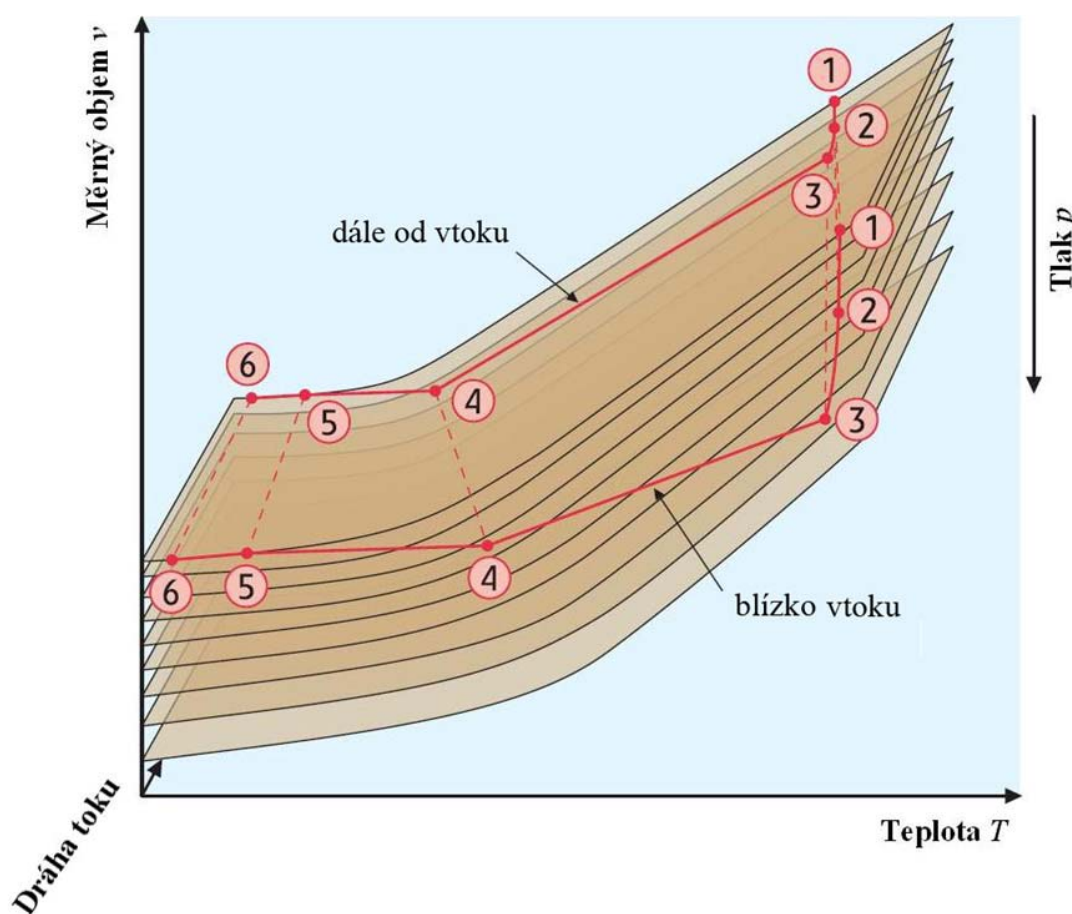
U technologie vstřikování plastů se objevuje pojem „ p - v - T řízení“ vstřikovacího procesu, což není nic jiného než řízení oblasti dotlaku 3-4, někdy na základě zjednodušení označované jako „izobarický dotlak“, za účelem vyrovnávání variability technologických parametrů procesu, především kolísání teploty a tlaku taveniny. Cílem p - v - T řízení je dosažení stejné hodnoty měrného objemu výstřiku

v měřeném bodě při jeho vyjmutí ze vstřikovacího nástroje pro opakující se výrobní cykly, a tím zajištění dobré stability výroby [32].

Průběh vstřikovacího cyklu v p - v - T diagramu dává komplexnější informaci o probíhajících dějích během procesu vstřikování plastů, než tomu bylo u průběhu tlaku v dutině nástroje, ve kterém se odrazí víceméně pouze proces plnění dutiny.

2.5.2 Vliv dráhy toku na vstřikovací cyklus v p - v - T diagramu

Jak již bylo zmíněno, popsany dvojrozměrný p - v - T diagram s časovou závislostí stavových veličin ve vstřikovacím cyklu dává informaci o dějích pouze v jednom bodě výstřiku. Pro bližší představu se pro technologii vstřikování termoplastů s výhodou používá trojrozměrný p - v - T diagram, který je rozšířen o osu dráhy toku taveniny (viz obr. 21). Z obrázku je zřejmé, že s rostoucí vzdáleností dráhy toku taveniny klesá její tlak, což má následně vliv na nehomogenitu měrného objemu v závislosti na toku taveniny. Měrný objem roste u konvenční technologie s rostoucí vzdáleností od vtoku [24, 33, 45].



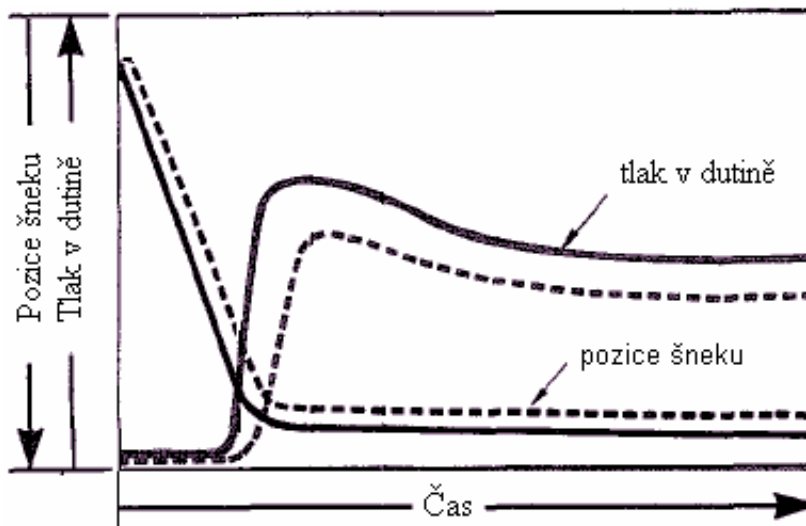
Obr. 21. Vstřikovací cyklus v p - v - T diagramu rozšířeném o osu dráhy toku

Při detailnějším rozboru měrného objemu ve vstřikovaném díle je možné zaznamenat změny i napříč stěnou výstřiku, které vycházejí z obdobného principu jako je změna měrného objemu v závislosti na dráze toku taveniny v dutině nástroje. V povrchových vrstvách výrobku dochází k rychlejšímu chladnutí, zatímco ve vrstvách vnitřních se tavenina ochlazuje pomaleji a zároveň je zde možné déle působit dotlakem, což má za následek větší měrný objem výstřiku u stěn dutiny nástroje. Tyto rozdíly měrného objemu ve výstřiku jsou potom příčinou vzniku vnitřního pnutí [24].

Řada nových technologií klade důraz na p-v-T diagramy a snaží se řídit vstřikovací proces tak, aby dosáhly co nejoptimálnějšího plnění. Pokud bychom zanesli do takového p-v-T diagramu například technologii kompresního vstřikování, která si klade za cíl dosažení vstřikování dílů s minimálním vnitřním pnutím, vykazovala by fáze dotlaku pro všechna místa stejný průběh [33, 41].

2.6 Řízení vstřikovacího procesu

Vzhledem k reologickému chování tavenin plastů popsanému v kapitole 2.2 má na vstřikovací proces značný vliv způsob jeho řízení. Pro dosažení maximální stability vstřikovacího procesu jsou k řízení důležité dva parametry, a to pozice

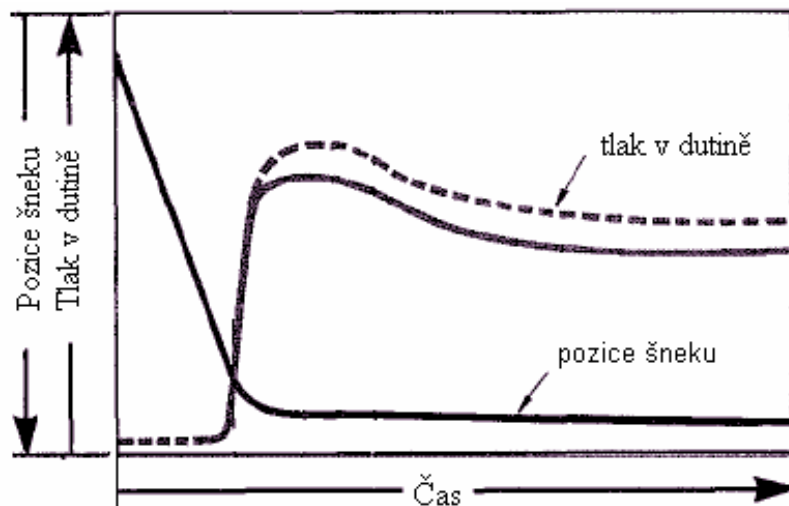


Obr. 22. Vliv zvýšené viskozity taveniny na průběh pozice šneku a tlaku v dutině nástroje při stejném systémovém tlaku

šneku a tlak v dutině nástroje. Změny ostatních technologických parametrů jako jsou systémový tlak, teplota taveniny atd. se přímo projeví v závislosti pozice šneku a tlaku v dutině nástroje na čase.

Pokud by byl proces řízen prostřednictvím systémového tlaku a parametr pozice šneku nebo tlaku v dutině nástroje by sloužil jen pro monitorizaci procesu,

pak by docházelo k značné variabilitě vstřikovacího procesu. Se změnou viskozity taveniny a stálým systémovým tlakem by se totiž změnila vstřikovací rychlost a následně tlak v dutině nástroje. Například zvýšením viskozity taveniny se za stejného



Obr. 23. Vliv zvýšení systémového tlaku za účelem dosažení požadované rychlosti pohybu šneku na tlak v dutině nástroje při zvýšené viskozitě taveniny

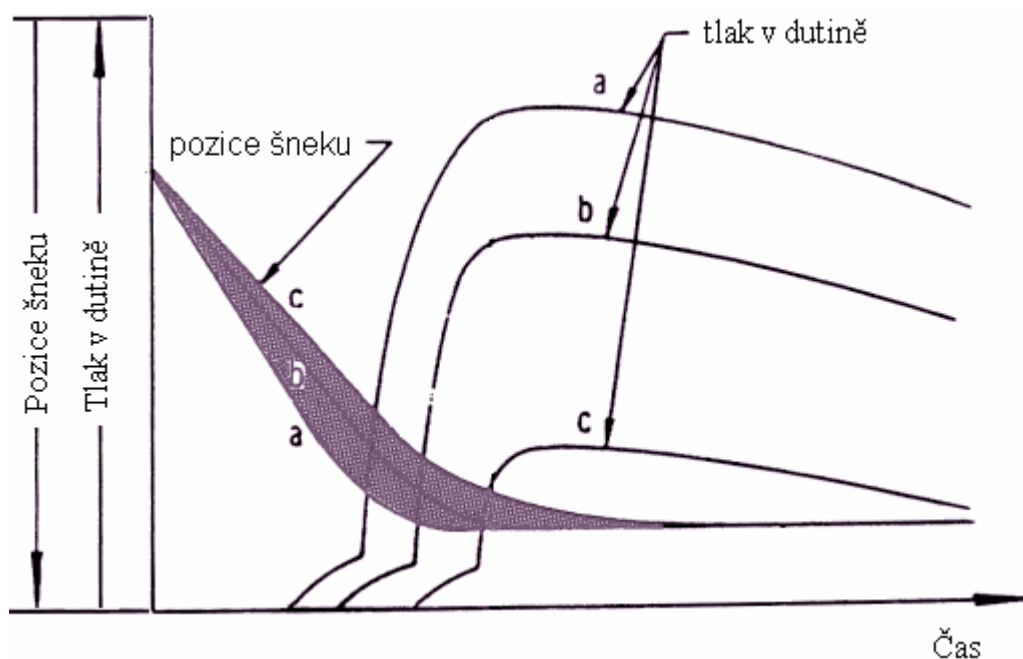
systémového tlaku snižuje rychlost pohybu šneku, a tím se zpozdí a zmenší průběh tlaku v dutině nástroje (viz obr. 22). Pokud zvýšíme systémový tlak za účelem dosažení požadovaného průběhu pozice šneku, pak se mimo jiné sníží vlivem smykových namáhání

taveniny její viskozita a to způsobí zvýšení tlaku uvnitř dutiny nástroje, zastříknutí výrobku a výrobky jsou následně těžší s větším vnitřním pnutím (viz obr. 23) [1, 3].

2.6.1 Vliv viskozity taveniny na rychlost pohybu šneku

Pokud je vstřikovací proces řízen závislostí systémového tlaku na poloze šneku, pak je rychlost pohybu šneku při plnění dutiny závislá na odporu taveniny vůči šneku a tedy na její viskozitě. S rostoucím systémovým tlakem a klesající viskozitou taveniny roste vstřikovací rychlost. Vliv rozdílné viskozity na rychlost pohybu šneku za stejné doby vstřiku je znázorněn v obr. 24.

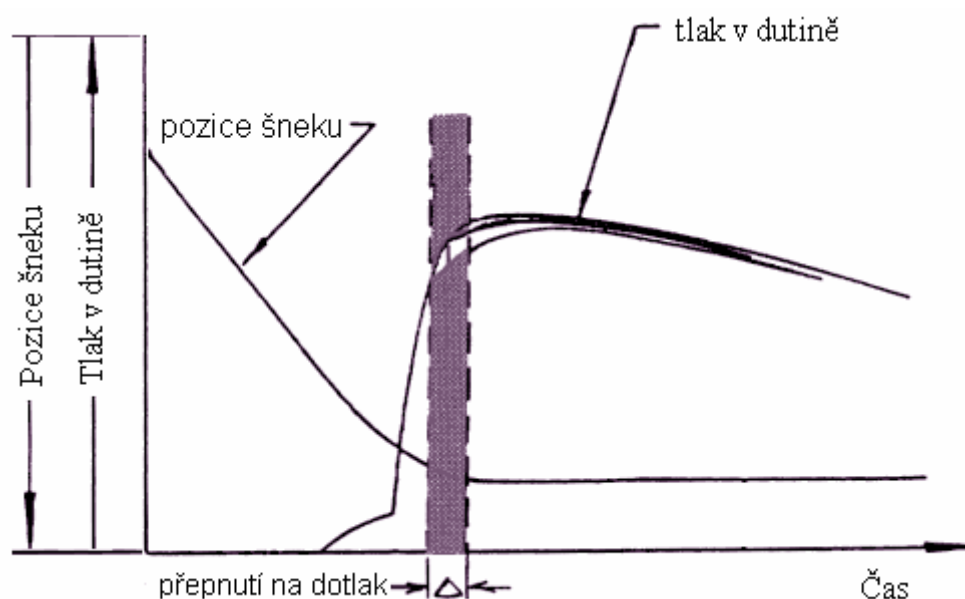
V případě příliš velké rychlosti pohybu šneku (a) tlak v dutině nástroje značně roste až do konce doby vstřiku. Výsledkem je zastříknutí dílu nebo těžší díly s většími rozměry, tedy s díly mimo toleranci. Pokud je rychlost pohybu šneku malá (c), pak vnitřní tlak v dutině indikuje nedostříknutý díl nebo díl s propadlinami a rozměrovými odchylkami. Tato skupina parametrů (rychlost pohybu šneku, teplota taveniny, viskozita taveniny) má dramatický vliv na průběh tlaku v dutině nástroje, respektive na vlastnosti výstřiku, jak je zřejmé z obr. 24 [1].



Obr. 24. Vliv viskozity taveniny na rychlost pohybu šneku

2.6.2 Vliv kolísání doby vstřiku na tlak v dutině nástroje

U vstřikovacích strojů je možné nastavit dobu vstřikovací fáze za účelem oddělení fáze vstřiku a fáze dotlaku. Navzdory dobré stabilitě průběhu rychlosti pohybu šneku mezi jednotlivými zdvihy se mohou objevit odlišné průběhy vnitřního tlaku v dutině formy. Markantní rozdíly mohou být především v tlakové špičce

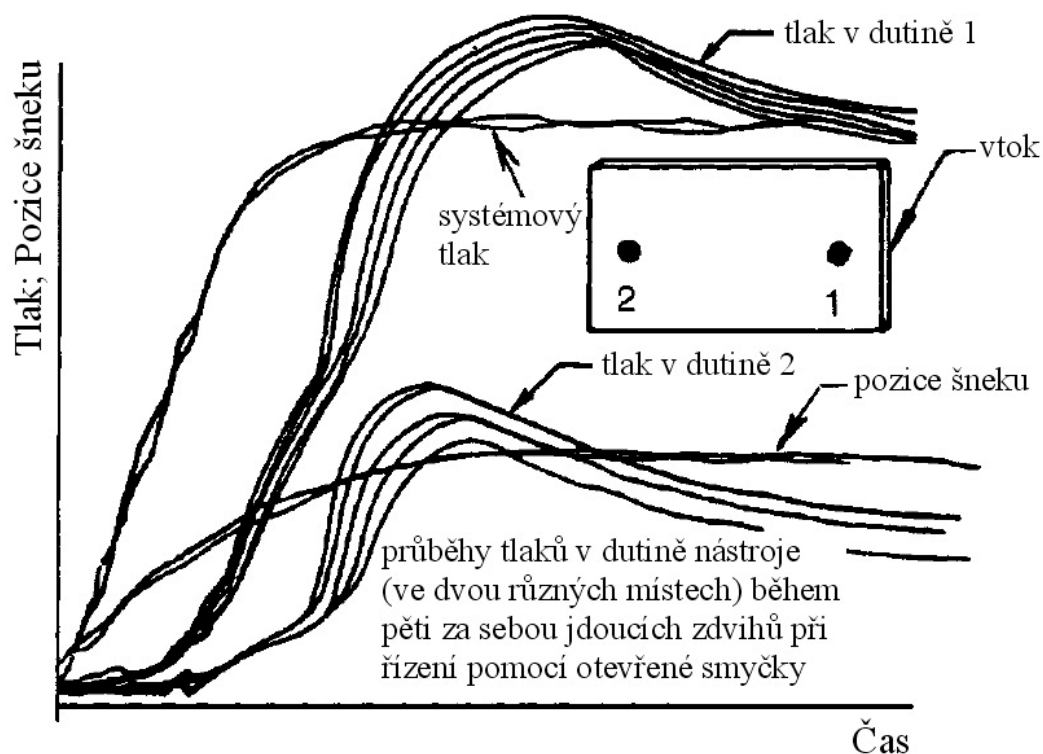


Obr. 25. Vliv variability vstřikovací doby na tlak v dutině nástroje

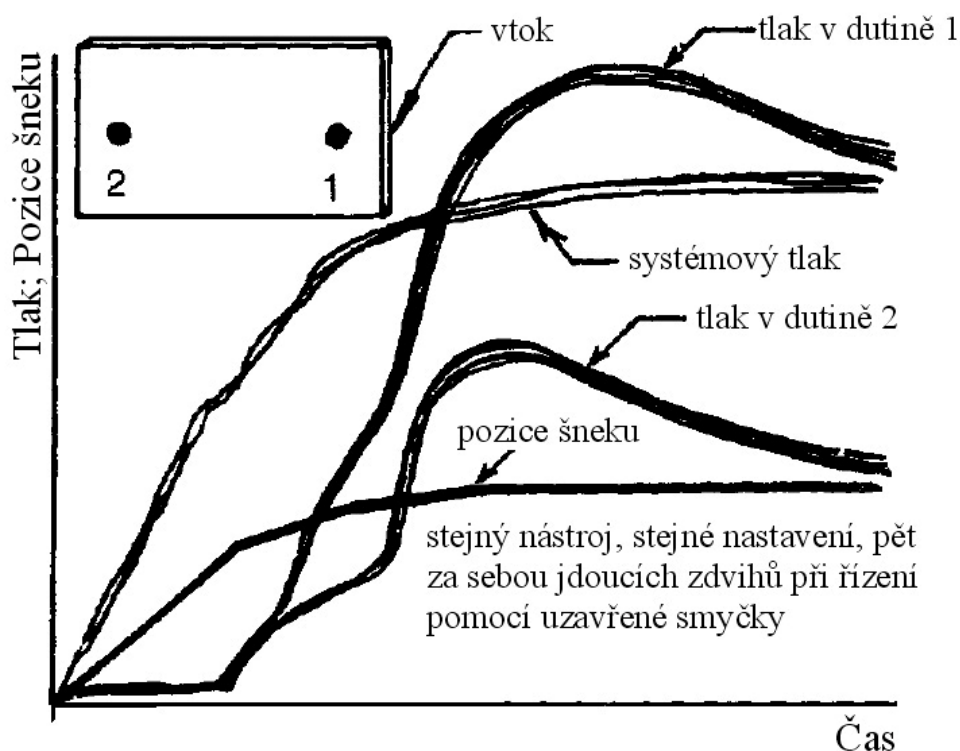
v okamžiku přepnutí na dotlak. Rozdíly jsou způsobeny různou délkou vstřikovací fáze, která je zapříčiněna odchylkami spínání ventilů a elektromagnetů mezi jednotlivými cykly při řízení. To je jedním z důvodů, proč se v praxi používá především přepnutí na dotlak podle polohy šneku. Vliv variability vstřikovací doby na tlak v dutině nástroje je zaznamenán na obr. 25 [1, 20].

2.6.3 Řízení vstřikovacího procesu pomocí uzavřené a otevřené smyčky

V dnešní době se u vstřikovacích strojů využívá k řízení vstřikovacího procesu výhradně servořízení s uzavřenými smyčkami. Řízení pomocí uzavřených smyček spočívá v měření skutečné hodnoty řízeného parametru a v porovnání této hodnoty s hodnotou požadovanou. Rozdíl těchto dvou hodnot nebo také „chyba“ je využita ke korekci parametru. Oproti tomu řízení pomocí otevřené smyčky spočívá v řízení požadovaného parametru, ovšem bez zpětné vazby, a tedy bez korekce skutečné hodnoty parametru. Vliv vstřikovacích strojů využívajících k řízení uzavřených a otevřených smyček na vstřikovací proces je zachycen na obr. 26 a 27. Z obrázků je zřejmá výhoda používání řízení pomocí uzavřených smyček [1, 20].



Obr. 26. Vliv řízení s otevřenou smyčkou na stabilitu vstřikovacího procesu



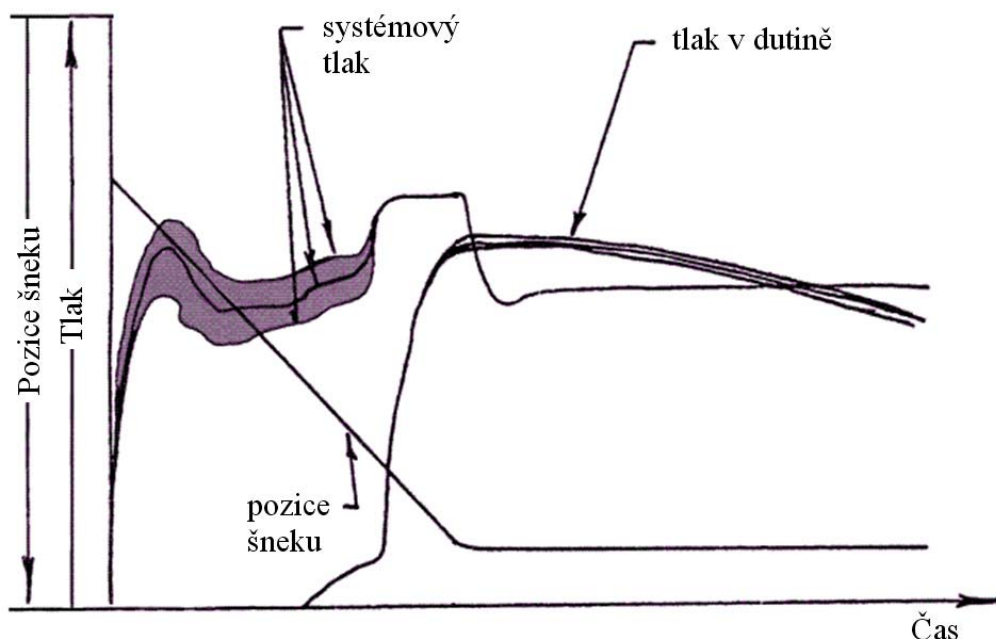
Obr. 27. Vliv řízení s uzavřenou smyčkou na stabilitu vstřikovacího procesu

2.6.4 Optimální řízení vstřikovacího procesu

Řízení pomocí uzavřených smyček a používání rychlosti pohybu šneku jako řídicího parametru je neoptimálnější dosud známý způsob řízení vstřikovacího procesu. Vstřikovací proces využívající k řízení rychlost pohybu šneku není tak významně ovlivněn viskozitou taveniny, jako je tomu u vstřikovacího procesu řízeného pomocí systémového tlaku.

Způsob, kdy je k řízení vstřikovacího procesu využíváno závislosti rychlosti pohybu šneku na poloze šneku, je známý pod názvem „řízený vstřik“ nebo také „objemové vstřikování“. Řídicím parametrem je vlastně objem taveniny vstříknutý za určitý čas.

Obr. 28 znázorňuje řízení systémového tlaku za účelem zachování požadované rychlosti pohybu šneku. Výsledkem je proces se stabilnějšími průběhy vnitřních tlaků. Z pohledu systémového tlaku je využíváno v tomto případě řízení pouze systémového tlaku limitního, který stroj nesmí při vstřikování překročit [1, 3].



Obr. 28. Řízení systémového tlaku pro dodržení požadované rychlosti vstřikování

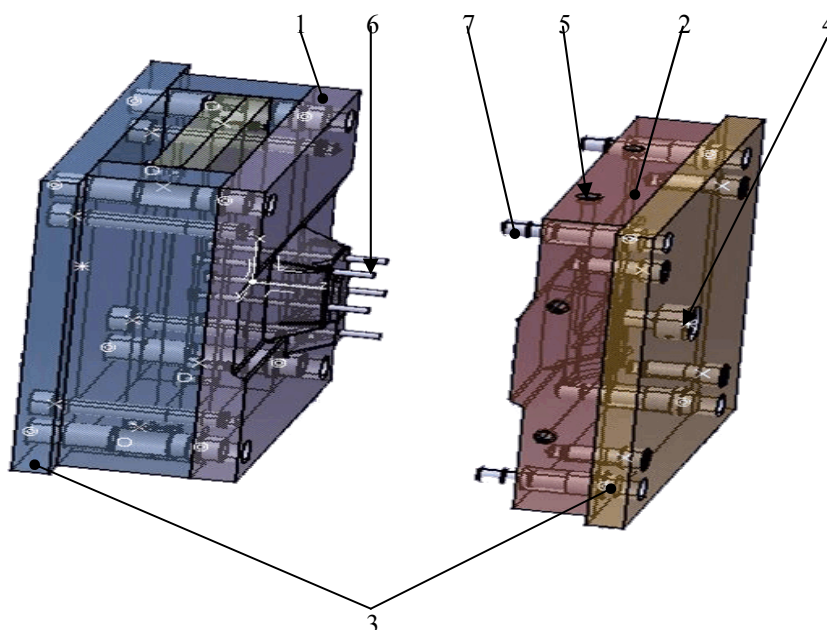
2.7 Nástroje pro vstřikování termoplastů a řízení trysek vtokového systému

Vstřikovací formy (viz obr. 29) je možno rozdělit podle počtu dutin nástroje na jednonásobné a vícenásobné. Nově se zavádí pojem „family“ nástroj, pod kterým se skrývá vícenásobná forma, jejíž tvar dutin se od sebe liší, a výstřiky tvoří po montáži jeden výrobek.

Podle konstrukčního řešení je možné vstřikovací nástroje rozdělit na dvoudeskové, třideskové, vytáčeční, čelist'ové apod. a podle konstrukce vstřikovacího stroje na formy se vstřikem kolmo na dělicí rovinu a na formy se vstřikem do dělicí roviny.

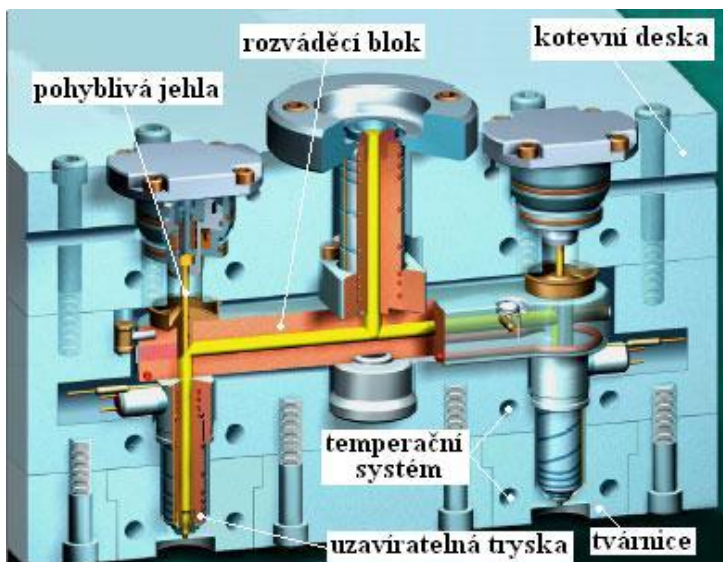
Každá vstřikovací forma se skládá z dílů vymežujících *tvarovou dutinu*, *z vtokového, temperančního a vyhazovacího systému, upínacích a vodících elementů* [8, 21, 22].

Vtokový systém je systém kanálů a ústí vtoku, který musí zajišťovat správné naplnění dutiny formy, snadné oddělení a vyhození vtokového zbytku. Konstrukční řešení vtokového systému závisí na konkrétním tvaru výstřiku, násobnosti formy a na tom, zda je vtoková soustava konstruována jako *studený*, nebo *horký rozvod*.



Obr. 29. Schéma vstřikovací formy: 1. Tvárník, 2. Tvárnice, 3. Rám formy, 4. Vtokový systém, 5. Temperační systém, 6. Vyhadzovací systém, 7. Středící součásti

Studený vtokový systém je využíván především u jednonásobných forem a patří sem např. tunelový vtok, kuželový vtok nebo vtok bodový, který umožňuje



Obr. 30. Schéma formy s horkým vtokovým systémem a trysky s uzavíratelnou jehlou

odtrhávání vtokového zbytku přímo ve formě. Z hlediska plnění dutiny formy je třeba, aby ústí vtoku zatuhlo až po dokonalém zaplnění dutiny, jinak bude výrobek nedostříknutý nebo s propadlinami.

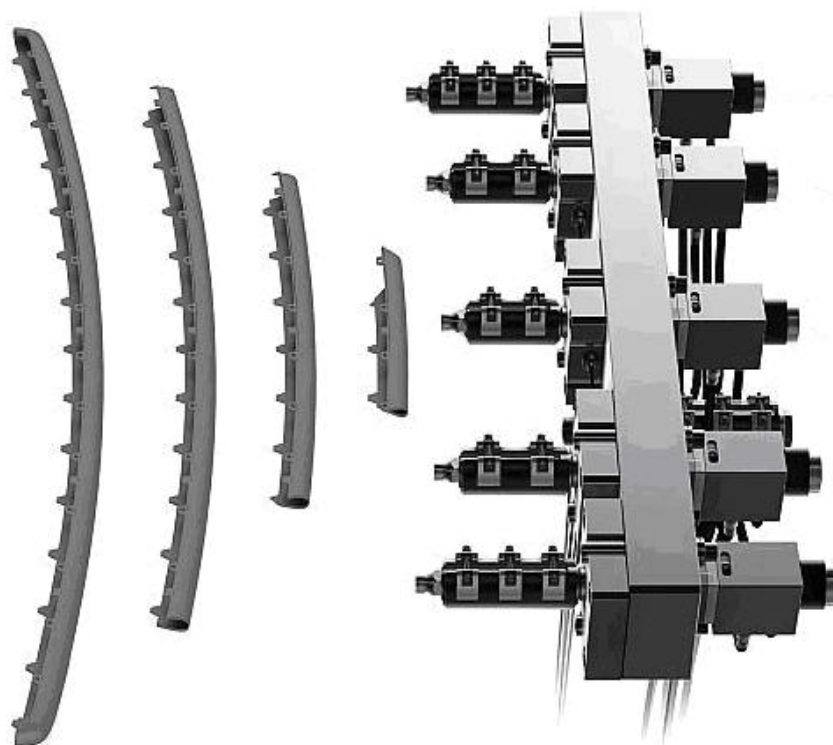
Na rozdíl od studeného vtokového systému je **horký vtokový systém**

bezodpadový a zajišťuje stálou teplotu rozváděné taveniny plastu. Je využíván zejména u vícenásobných forem. Vyústění horkého vtokového systému může být

uzavíráno např. jehlou, viz obr. 30. Horký vtokový systém tvoří rozváděcí blok, který zajišťuje rozvod taveniny od trysky stroje až k dutině formy a udržuje taveninu ve viskózně tekutém stavu. U systémů s vyhříváním ústím vtoku je teplo do ústí vtoku přiváděno buď torpédem, ve kterém je uloženo topné těleso, nebo odporovým topením umístěným kolem trysky. Použití horkého vtokového systému umožňuje prodloužení doby vstřikovacího cyklu, aniž by došlo ke ztuhnutí taveniny v ústí vtoku [21, 22].

2.7.1 Technologie konvenčního kaskádového vstřikování

Technologie konvenčního kaskádového vstřikování (viz obr. 31), dále v disertační práci též označována jako technologie „KK“, je využívána při plnění výstřiků více vtoky. Ke vstřikování je využíván výhradně horký vtokový systém s případnou nástavbou pomocných studených vtoků pro další rozvod taveniny v nástroji. Horký vtokový systém je zakončen uzavíratelným jehlovým ústím vtoku, které umožňuje uzavření či otevření jednotlivých trysek nezávisle na sobě. Princip spočívá v postupném otevírání jednotlivých trysek tak, aby bylo zajištěno plynulé



Obr. 31. Kaskádové vstřikování

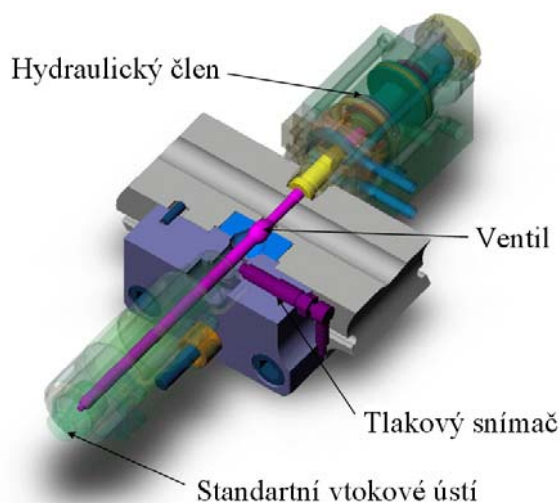
plnění dutiny nástroje. Uzavřením ústí vtoku jsou současně na konci fáze dotlaku odstraněny stopy po ústí vtoku na výstřiku. Pohyb jehly uvnitř trysek horkého rozvodu je zajištěn hydraulickým, elektrickým a v menší míře i pneumatickým systémem. Této technologie se využívá především u dlouhých a velkoplošných výstřiků pro zamezení vzniku studených spojů při plnění dutiny vstřikovacího nástroje [21, 22].

2.7.2 Technologie vstřikování pomocí řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

Pro nezávislé řízení tlaku taveniny na jednotlivých tryskách vícevtokových horkých systémů je v současné době vyvíjena nová technologie, dále v disertační práci označovaná také jako technologie „RT“. Tato technologie využívá k řízení vstřikovacího procesu tlakových čidel umístěných přímo ve vtokové soustavě na jednotlivých tryskách a pomocí pohyblivé jehly ve vtokovém ústí, která působí jako

škrticí ventil, reguluje tlak taveniny v dané trysce.

Nejedná se tedy o řízení vstřikovacího stroje pomocí tlakových čidel, ale o řízení tlaku taveniny přímo uvnitř nástroje na jednotlivých tryskách vstřikovacího systému. Vstřikovací stroj u této technologie působí ve fázi plnění dutiny pouze jako „dodavatel“ zplastikované taveniny pod určitým tlakem.



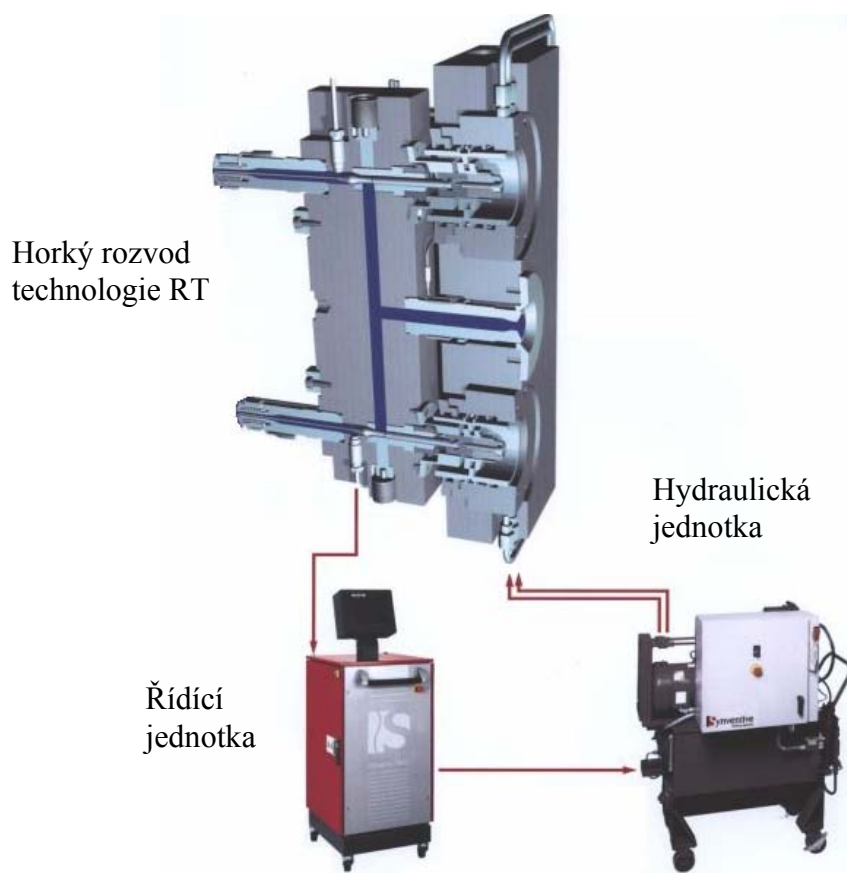
Obr. 32. Horký vtok technologie RT

Snímač tlaku, umístěný v příslušném vtokovém ústí (viz obr. 32), měří nepřetržitě tlak během plnění dutiny a řídicí jednotka porovnává takto naměřené tlakové hodnoty s nastavenými referenčními hodnotami – požadovanou tlakovou křivkou. Pomocí hydraulické jednotky pak řídicí jednotka nastavuje polohu ventilu tak, aby tlak taveniny v daném vstřikovacím ústí odpovídal příslušné hodnotě referenční křivky.

Při regulování polohy jehel působí na pracovní válec neustále hydraulický tlak z obou stran a to, oproti konvenčnímu řízení systému s uzavíratelnými tryskami, kde je možné využít pouze dvou poloh jehly (otevřená/uzavřená), umožňuje jemně přizpůsobeným přiváděním a odváděním hydraulického oleje servoventily pod nebo nad píst plynule nastavovat a udržovat polohu jehly.

Tímto způsobem je možné nezávisle pro každou trysku horkého rozvodu zvlášť realizovat vlastní vstřikovací a dotlakový profil v podobě závislosti tlaku taveniny na čase. Nabízí se potenciál využití této nové technologie u složitých výrobků vstřikovaných dosud obtížně konvenčním kaskádovým vstřikováním či především u nově používaných family nástrojů.

Schéma zapojení systému technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, tedy horkého rozvodu, hydraulické jednotky a řídicí jednotky je na obr. 33 [34, 37].



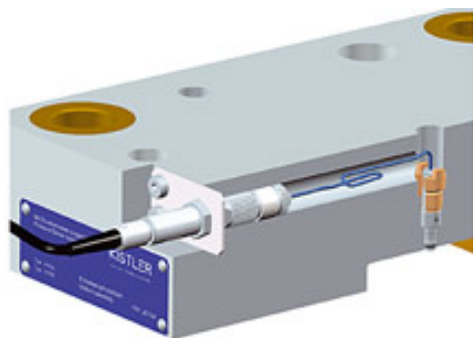
Obr. 33. Schéma zařízení pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

2.8 Metody měření tlaku v dutině formy

Se zvyšujícími se požadavky na kvalitu vstřikovaných dílů a požadavky na kontrolu nad vstřikovacím procesem se do vstřikovacích forem stále častěji instalují tlakové snímače, které umožňují monitorování vnitřního tlaku v dutině nástroje v průběhu vstřikovacího cyklu. Průběhu tlaku v dutině nástroje je možné využít jak k analyzování procesu vstřikování, vlivu různých technologických parametrů na tlak v dutině nástroje, a tedy na kvalitu vstřikovaného dílu, tak pro řízení samotného vstřikovacího procesu.

Pro měření tlaku v dutině vstřikovací formy existují dva hlavní způsoby měření, a těmi jsou *přímé* a *nepřímé měření tlaku* [7].

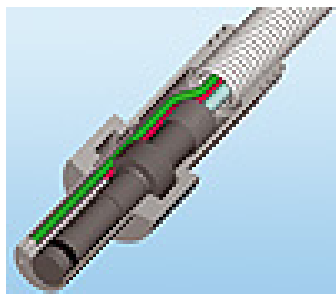
U **přímého měření** tlaku (viz obr. 34) jsou snímače v přímém kontaktu



Obr. 34. Metoda přímého měření

s plastem uvnitř vstřikovací formy a svou aktivní plochou kopírují povrch dutiny formy. Snímače pro přímé měření tlaku musí odolávat vysokým teplotám taveniny, a tudíž jsou na ně kladeny vyšší nároky, než na snímače nepřímého měření. Metoda přímého měření je v praxi z důvodu přímého styku snímače s plastem i přes vyšší nároky na snímače upřednostňována.

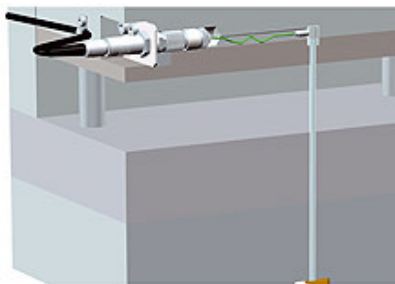
Vedle metody přímého měření tlaku je i kombinace přímého měření tlaku se současným snímáním teploty, což je výhodné pro detailnější analyzování dějů v dutině nástroje. Kombinované snímače tlaku a teploty měří tyto dva parametry na



Obr. 35. Metoda přímého měření tlaku a teploty

stejném místě v dutině nástroje (viz obr. 35).

V případě **nepřímého měření** tlaku (viz obr. 36) jsou snímače umístěny mimo dutinu vstřikovací formy. Ve většině případů je snímač tlaku umístěn ve vyhazovací desce vstřikovací formy a tlak v dutině nástroje je přenášen vyhazovacími kolíky. Tento způsob měření se využívá u vstřikovacích nástrojů, kde není dostatek místa pro aplikaci přímé metody nebo je nežádoucí stopa po tlakovém snímači ve výstřiku, například při vstřikování optických dílů [33, 38, 41].



Obr. 36. Metoda nepřímého měření

Tření, deformace vyhazovací tyče a vyhazovací desky vnášejí do měření značné chyby, které se negativně projeví při řízení vstřikovacího procesu nebo jeho monitorování, což je nevýhodné pro uplatnění nepřímé metody v praxi [7, 36, 41].

Pro měření tlaku uvnitř dutiny vstřikovací formy se využívá především *piezoelektrických, piezorezistivních a tenzometrických* snímačů.

2.9 Hodnocení způsobilosti procesu a analýza rozptylu

K **hodnocení způsobilosti procesu** se používají indexy způsobilosti, které porovnávají předepsanou maximálně přípustnou variabilitu hodnot danou tolerančními mezemi se skutečnou variabilitou sledovaného znaku jakosti dosahovanou u statisticky zvládnutého procesu.

Základní podmínkou pro stanovení indexů způsobilosti je, že hodnocený proces musí být ve statisticky zvládnutém stavu. Druhou podmínkou, která musí být splněna v případě měřitelných znaků jakosti při použití standardních vztahů pro výpočet indexů způsobilosti je, že rozdělení sledovaného znaku jakosti musí odpovídat normálnímu rozdělení.

Index způsobilosti C_p je mírou potenciální schopnosti procesu zajistit, aby hodnota sledovaného znaku jakosti ležela uvnitř tolerančních mezí. Lze ho stanovit pouze v případech, kdy jsou specifikovány oboustranné toleranční meze. Hodnota indexu C_p je poměrem maximálně přípustné a skutečné variability hodnot znaku jakosti bez ohledu na jejich umístění v tolerančním poli. Skutečná variabilita sledovaného znaku jakosti je vyjádřena hodnotou 6σ , jež v případě normálního rozdělení vymezuje oblast, v níž s 99,73 % pravděpodobností leží všechny hodnoty.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_s} \quad (15)$$

kde LSL dolní toleranční mez,
 USL horní toleranční mez,
 σ_s směrodatná odchylka základního souboru.

Index způsobilosti C_{pk} , na rozdíl od indexu C_p , zohledňuje nejen variabilitu sledovaného znaku jakosti, ale i jeho polohu vůči tolerančním mezím. Jeho hodnota vyjadřuje poměr vzdálenosti střední hodnoty \bar{x} sledovaného znaku jakosti od bližší toleranční meze k polovině skutečné variability. Index C_{pk} lze počítat jak v případě oboustranné, tak jednostranné tolerance. K příslušným výpočtům lze využít vztahy:

- jednostranná tolerance - předpis dolní toleranční meze

$$C_{pk} = C_{pL} \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma_s} \quad (16)$$

- jednostranná tolerance - předpis horní toleranční meze

$$C_{pk} = C_{pU} \frac{USL - \bar{x}}{3\sigma_s} \quad (17)$$

- oboustranná tolerance - předpis obou tolerančních mezí

$$C_{pk} = \min \left(C_{pL}; C_{pU} \right) \quad (18)$$

Způsobilost výrobního zařízení se na rozdíl od způsobilosti procesu vztahuje k opakovatelnosti produktu vyráběného na výrobním zařízení za stabilizovaných podmínek během kratší doby. Indexy způsobilosti výrobního zařízení se počítají podle stejných vztahů jako indexy způsobilosti procesu s tím rozdílem, že odpovídající indexy způsobilosti výrobního zařízení se označují symboly C_m , C_{mk} [9, 10].

Pokud jsou pokusy realizovány za stejných podmínek, nemusí se objevit stejné výsledky, ale naopak lze pozorovat jistou proměnlivost. Celková proměnlivost všech výsledků je způsobena nejen působením sledovaných faktorů, ale i neznámých vlivů, které jsou příčinou proměnlivosti výsledků opakovaných za stejných podmínek a které můžeme pokládat za náhodné vlivy. **Analýzy rozptylu** rozdělí proměnlivost na jednotlivé složky podle jednotlivých činitelů a na složku, která přísluší náhodným vlivům. Pak je možné určit, zda je variabilita hodnot výsledkem působení jednotlivých činitelů, či je pouze důsledkem náhodných vlivů, a tedy variabilita hodnot není významná [11].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části je rozbor a porovnání vstřikovacího procesu dvou technologií vstřikování plastů, jejich vlivu na vlastnosti výstřiků a stabilitu procesu. Analyzována je technologie konvenčního kaskádového vstřikování využívající tzv. řízeného vstřiku, tedy řízení objemu taveniny vstřikovaného do dutiny nástroje,

Tab. 1. Označení technologií

Druh technologie	Označení
Technologie konvenčního kaskádového vstřikování	KK
Technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje	RT

v disertační práci označovaná také jako technologie „KK“ (viz tab. 1), a nová technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, která byla během

experimentu dále částečně vyvíjena. Tato nová technologie spočívá v řízení tlaku taveniny na jednotlivých tryskách vícevtokového systému vstřikovacího nástroje, v disertační práci označována také jako technologie „RT“.

Mezi předpokládané výhody nové technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje patří:

- rovnoměrné podmínky plnění dutiny vstřikovacího nástroje,
- minimální rozdílnost vlastností výrobku v různých místech výstřiku,
- vyšší stabilita vstřikovacího procesu,
- minimální vliv kolísání technologických parametrů na stabilitu výroby a na vlastnosti výstřiků,
- větší flexibilita vstřikovacího procesu.

Pro experimentální část bylo třeba vybrat velkorozměrný díl, který je vstřikován pomocí vícevtokových ústí a kde by se projevíly předpokládané výhody technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

Za významné podpory společnosti Cadence Innovation - Libáň byl k analýze použit „family“ nástroj obsahující čtyři tvarové dutiny. Pomocí tohoto nástroje je na jeden zdvih vyroben pár zadních dveřních výplní pro automobil Škoda Roomster včetně příslušných kapes k těmto výplním.

Zkompleťované dveřní výplně, tedy dveřní výplň levá a pravá s kapsami, jsou zachyceny na obr. 37. Hmotnost výstřiků je 1247 ± 20 g v případě dveřní výplně a v případě kapsy je hmotnost 123 ± 5 g.



Obr. 37. Pravá a levá zadní dveřní výplň s kapsami v barvě Onyx

Pro porovnání zmíněných technologií bylo během experimentálních měření využito snímání průběhu vnitřního tlaku v dutině nástroje, systémového tlaku a polohy šneku během vstřikovací a dotlakové fáze. Experimenty byly doprovázeny softwarovými simulacemi obou technologií. Nedílnou součástí bylo porovnání vlivu technologií na homogenitu mechanických vlastností výstřiku. V rámci ověření a porovnání technologií při sériové výrobě byla analyzována i procesní způsobilost jak technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, tak konvenční technologie kaskádového vstřikování.

3.1 Charakteristika použitých materiálů

Ke vstřikování byl použit materiál polypropylen Daplen EE137HP vyráběný firmou Borealis.

Granulát je dodáván v „přírodním“ zbarvení a před zpracováním byl sušen dle instrukcí v materiálovém listu po dobu 3 hodin při teplotě 80 °C. Konečnou barvu výstřiku dodávají aditiva, která jsou mísená ve směšovacím zařízení instalovaném nad násypkou vstřikovacího stroje (viz obr. 38).

V rámci experimentu byly vstřikovány tři různé materiály pro analyzování vlivu různých druhů aditiv a množství regenerátu na vstřikovací proces (viz tab. 2). První materiál „A“ byl tvořen základním materiálem Daplen EE137HP s příměsí 3 % barviva Onyx 10-9816F/PP. Výstřiky vyrobené v těchto sériích mají černou barvu (viz obr. 37). Druhý materiál „B“ je obdobný materiálu „A“, ovšem s příměsí 3 %

stříbrného barviva Silbergrau 10-80069F/PP místo barviva Onyx (viz obr. 39). Tato aditiva byla dodávána společností Lifocolor. Třetí materiál „C“ se skládal z 67 %

Tab. 2. Označení druhu vstřikovaného materiálu

Druh materiálu	Označení
EE137HP + barvivo Onyx	A
EE137HP + barvivo Silbergrau	B
EE137HP + barvivo Onyx + 30 % regranulátu	C

materiálu EE137HP, 3 %
aditiva Onyx 10-
9816F/PP a 30 %
regranulátu tohoto
materiálu.

Vlastnosti
polypropylenu Daplen

EE137HP jsou uvedeny v tabulce 3. V tabulce 4 jsou zachyceny rozdíly vlastností tavenin materiálů A a B z pohledu indexu toku taveniny. Vzájemné porovnání vlastností materiálu A a C je zachyceno v tabulce 5.



Obr. 38. Vstřikovací jednotka stroje Engel se směšovacím zařízením

Původním záměrem provedení rozboru vstřikovacího procesu a porovnání technologií bylo analyzování vlivu změn viskozity materiálu na vstřikovací proces v důsledku různých teplot taveniny. Takovouto analýzu však nebylo možné provést vzhledem k nastavení teplot taveniny při vstřikovacím procesu na horní hranici zpracovatelských hodnot za účelem dosažení kvalitních dílů. Od tohoto záměru bylo tedy ustoupeno a obě technologie byly analyzovány s různými modifikacemi materiálu vyskytujícími se běžně v praxi.



Obr. 39. Pravá a levá zadní dveřní výplň v barvě Silbergrau

Tab. 3. Materiálová data polypropylenu Daplen EE137HP

Vlastnost	Jednotka	Hodnota	Norma / Metoda
Hustota	kg/m ³	980	ISO 1183
MFR (230 °C, 2,16 kg)	g/10min	11,0	ISO 1133
MFR (230 °C, 5,0 kg)	g/10min	42,0	ISO 1133
Mez pevnosti v tahu (50mm/min)	MPa	21,0	ISO 527-2
Modul pružnosti v tahu při 23 °C (50mm/min)	MPa	1600	ISO 527-2
Modul pružnosti v ohybu při 23 °C (2mm/min)	MPa	1500	ISO 178
Teplota měknutí dle Vicata A50	°C	132	ISO 306
Teplota tvarové stálosti dle Vicata (0,45 MPa)	°C	98,0	ISO 75-2
Vrubová houževnatost – metoda Charpy			
Při teplotě – 20 °C	kJ/m ²	3,6	ISO 179/1eA
Při teplotě 23 °C	kJ/m ²	22,0	ISO 179/1eA
Rázová houževnatost – metoda Charpy			
Při teplotě – 20 °C	kJ/m ²	66,0	ISO 179/1eU
Při teplotě 23 °C	kJ/m ²	NB	ISO 179/1eU

Tab. 4. Vliv aditiv na index toku taveniny polypropylenu Daplen EE137HP

Vlastnost	Jednotka	Daplen EE137HP	A	B	Norma
MFR (230 °C, 2,16 kg)	g/10 min	16,6	16,9	17,3	ISO 1133

Tab. 5. Vliv příměsi 30 % regranulátu na vybrané vlastnosti polypropylenu
Daplen EE137HP

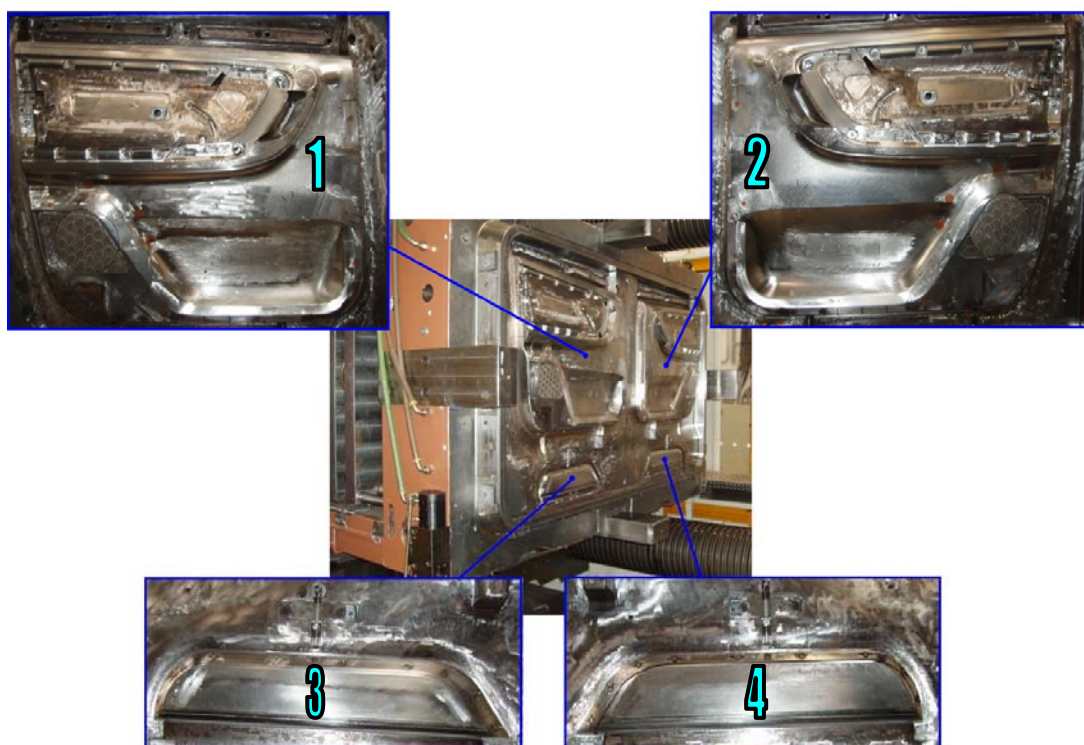
Vlastnost	Jednotka	A	C	Norma
MFR (230 °C, 2,16 kg)	g/10 min	16,9	15,4	ISO 1133
Modul pružnosti v ohybu při 23 °C (2mm/min)	MPa	1240	987	ISO 178
Mez pevnosti v tahu	MPa	21,0	20,1	ISO 527-2/1B/50
Vrubová houževnatost - metoda Charpy				
Při teplotě 23 °C	kJ/m ²	22,0	27,7	ISO 179/1eA
Rázová houževnatost – metoda Charpy				
Při teplotě 23 °C	kJ/m ²	NB	NB	ISO 179/1eU

3.2 Vstřikovací nástroj

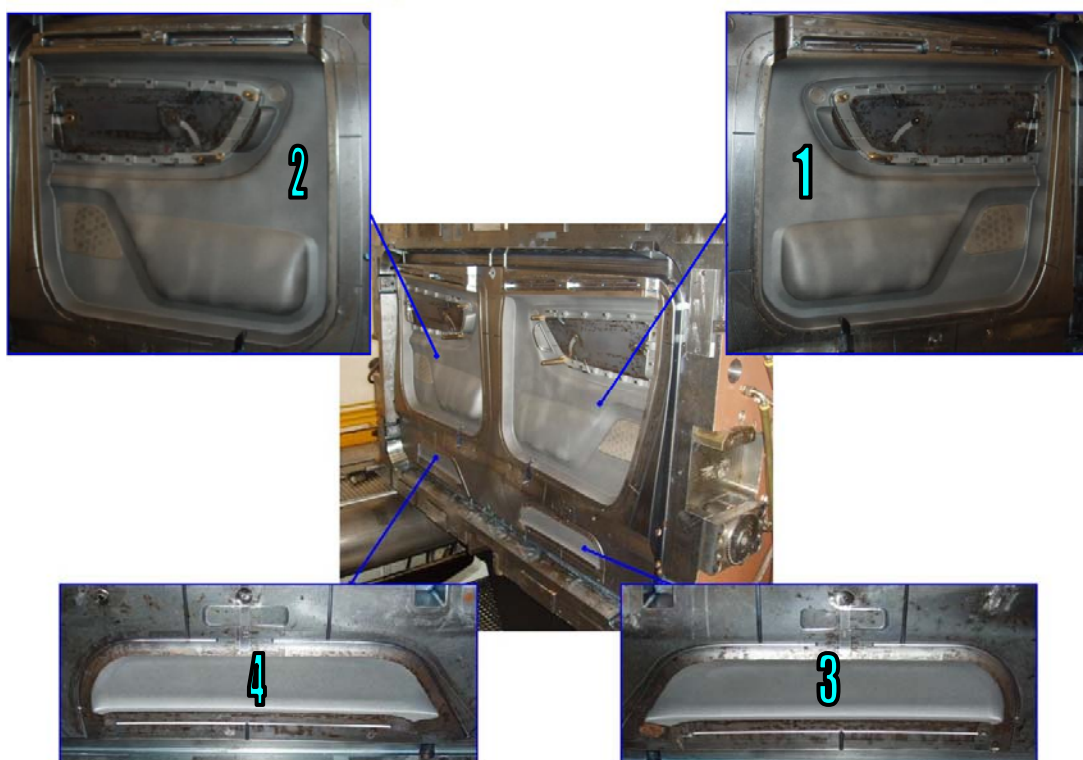
Vstřikovací dvoudeskový family nástroj vážící 43.500 kg obsahuje čtyři tvarové dutiny, které jsou uspořádány zrcadlově podle pomyslné vertikály uprostřed nástroje, tedy dutiny 2 a 4 odpovídají zrcadlově dutinám 1 a 3 (viz obr. 40 a 41).

Pro rozvod taveniny v nástroji je použito horkého vstřikovacího systému s deseti uzavíratelnými tryskami, který je konstruován tak, aby jej bylo možné využít jak pro vstřikování pomocí konvenčního kaskádového vstřikování, tak pomocí technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

Pro plnění dutiny 1 byly navrženy vtoky č. 1, 2, 3 a 4, zatímco pro dutinu 2 vtoky č. 6, 7, 8 a 9. Vtoky č. 5 a 10 zajišťují plnění dutin 3 a 4.

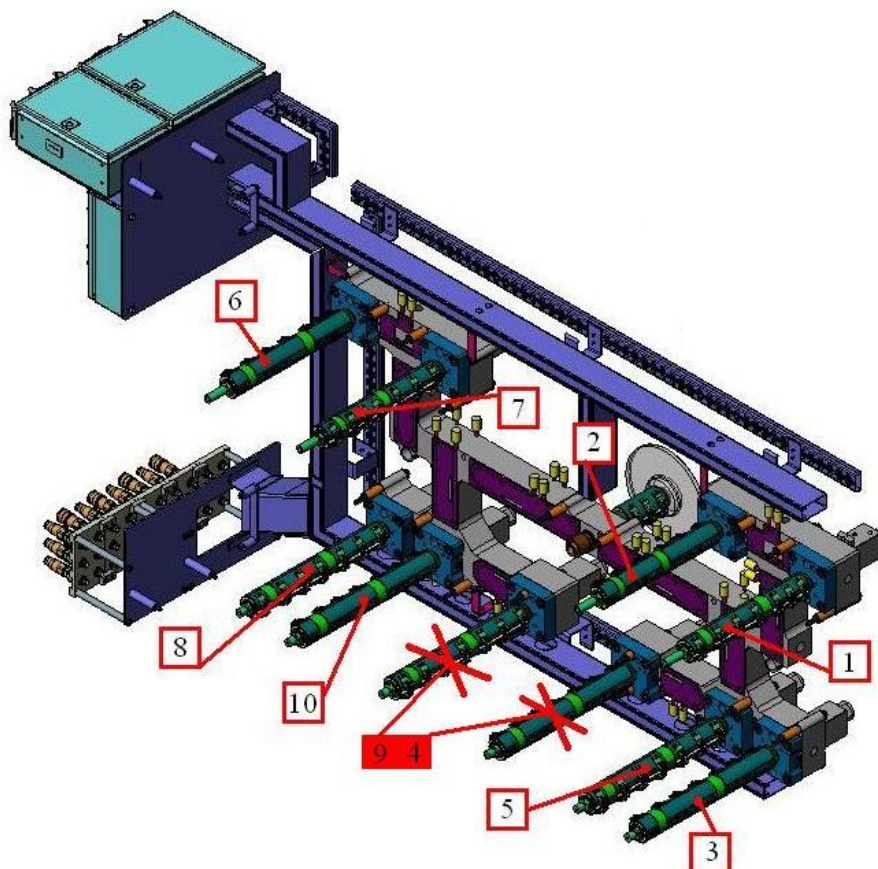


Obr. 40. Tvárník vstřikovacího nástroje



Obr. 41. Tvárnice vstřikovacího nástroje

Během prvních technologických zkoušek byla vtoková soustava pro vtoky 4 a 9 zaslepena z důvodu nevyužitelnosti vtoků s ohledem na princip plnění dutin 1 a 2 blíže popsaneého dále v kapitole 3.3.3. Obr. 42 zachycuje model horkého rozvodu vtokového systému.



Obr. 42. Model horkého vtokového systému

K temperaci nástroje bylo využito 20 temperačních okruhů, a to deseti okruhů pro tvárník a deseti okruhů pro tvárnici.

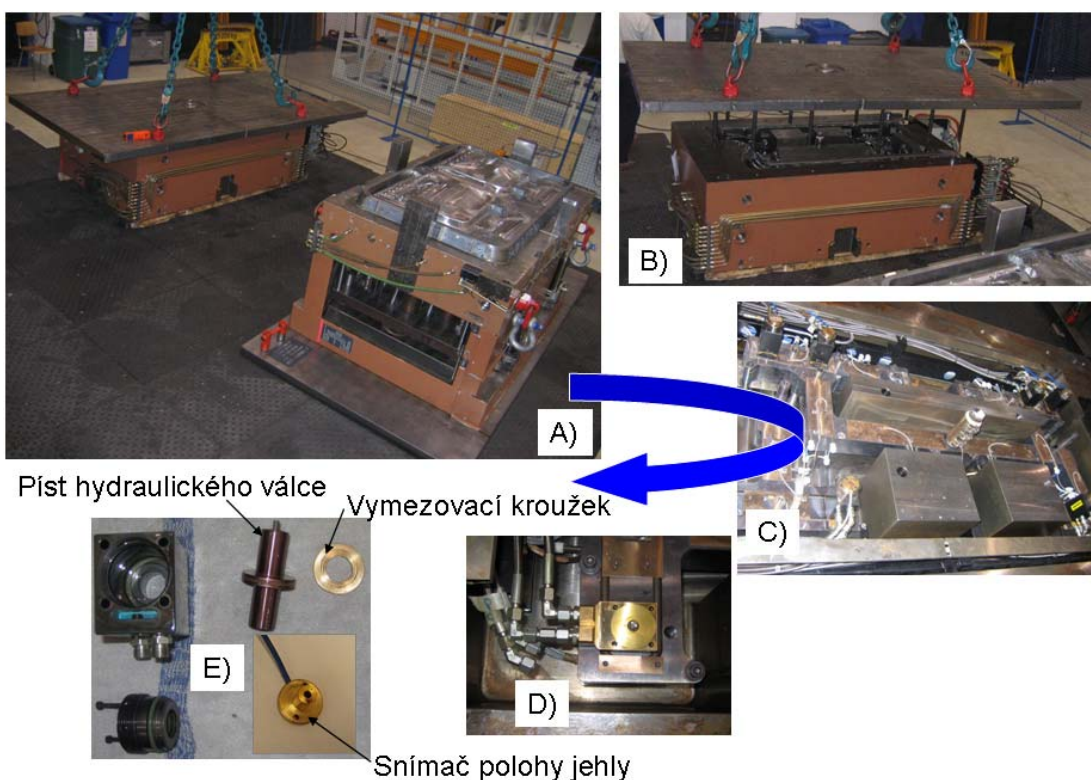
Periferním temperačním zařízením byl systém PulseTemp od společnosti Remak. Systém byl nastaven v modu řízení, při kterém je zajištěno řízení teploty temperačního média v každém okruhu zvlášť nezávisle na sobě pomocí mísení teplého média z temperačních přístrojů a studeného média o teplotě 13 °C z centrálního okruhu.

Výstřiky jsou vyhazovány dvoustupňovým hydraulickým systémem vyhazování.

3.2.1 Horký vtokový systém vstřikovacího nástroje

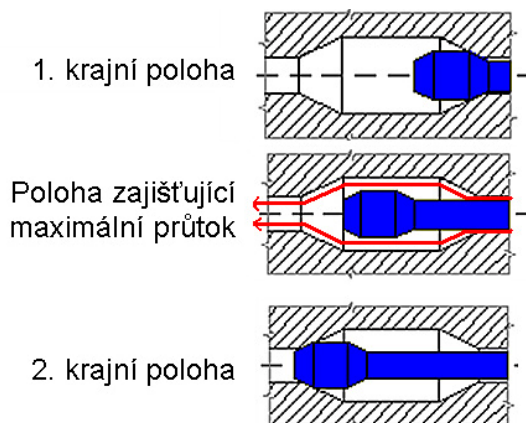
Pro experiment bylo třeba vstřikovací nástroj osadit speciálním horkým vtokovým systémem, který by umožňoval jak vstřikování pomocí technologie konvenčního kaskádového vstřikování, tak technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. Při změně technologie vstřikování byl vtokový systém vždy přestavěn pro danou technologii.

Aby bylo možné vtokový systém upravit, je nutné vstřikovací nástroj nejdříve rozložit na tvárník a tvárnici (viz obr. 43, krok A). Po odmontování kotevní desky tvárnice (krok B) je již zpřístupněn samotný horký rozvod (krok C). Pro přestavbu horkého rozvodu je nutné demontovat každou trysku zvlášť (krok D). Kompletně demontovaný hydraulický válec regulující prostřednictvím jehly průtok taveniny je zobrazen na obrázku 43 krokem E.



Obr. 43. Postup přestavby horkého rozvodu při změně technologie mezi konvenčním kaskádovým vstřikováním a řízením tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje: A) rozdělení nástroje, B) odejmutí kotevní desky, C) horký vtokový systém, D) pohled na trysku horkého rozvodu, E) jednotlivé díly hydraulického válce

Principem přestavby horkého rozvodu mezi technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje a konvenčního kaskádového vstřikování je montáž/demontáž vymezovacího kroužku, zobrazeného na obr. 43, krok E. Vymezovací kroužek se nachází v hydraulickém válci trysky a je umisťován do pístu ovládajícího jehlu uzavíratelného vtoku, kde má funkci vymezení možné dráhy pohybu jehly. Pokud je kroužek demontován, pak jehla může nabývat libovolných



Obr. 44. Polohy vstřikovací jehly v horkém rozvodu

poloh pomocí řízení mezi dvěma krajními polohami, a to mezi 1. a 2. krajní polohou, při kterých tavenina danou tryskou neprotéká (viz obr. 44). Demontování kroužku je využito u technologie řízení tlaku ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. Ve

skutečnosti se jehla u této technologie nepohybuje mezi oběma krajními polohami, ale pouze mezi 1. krajní polohou a polohou zajišťující maximální průtok taveniny.

Pokud je kroužek zamontován, pak je pohyb jehly omezen pouze mezi dvěma polohami, a to mezi 2. krajní polohou a polohou zajišťující maximální průtok taveniny. V tomto případě se jedná o technologii konvenčního kaskádového vstřikování a systém využívá pouze těchto dvou poloh a ne, na rozdíl od technologie řízení tlaku taveniny, poloh i mezi vymezovacími polohami.

3.3 Řízení vstřikovacího procesu

Způsob řízení vstřikovacího procesu byl závislý na požadavcích odlišných technologií a lišil se především řízením horkého vtokového systému vstřikovacího nástroje. Technologické parametry stroje byly zadány pro obě technologie maximálně shodně, s ohledem na dosažení kvality dílu a požadavky dané technologie.

Vstřikovacím strojem použitým v experimentu byl stroj Engel Duo 18000H / 18000H / 3200 (viz obr. 45 a 46) určený především pro výrobu velkoplošných výstřiků. Technické parametry vstřikovacího stroje Engel Duo jsou uvedeny

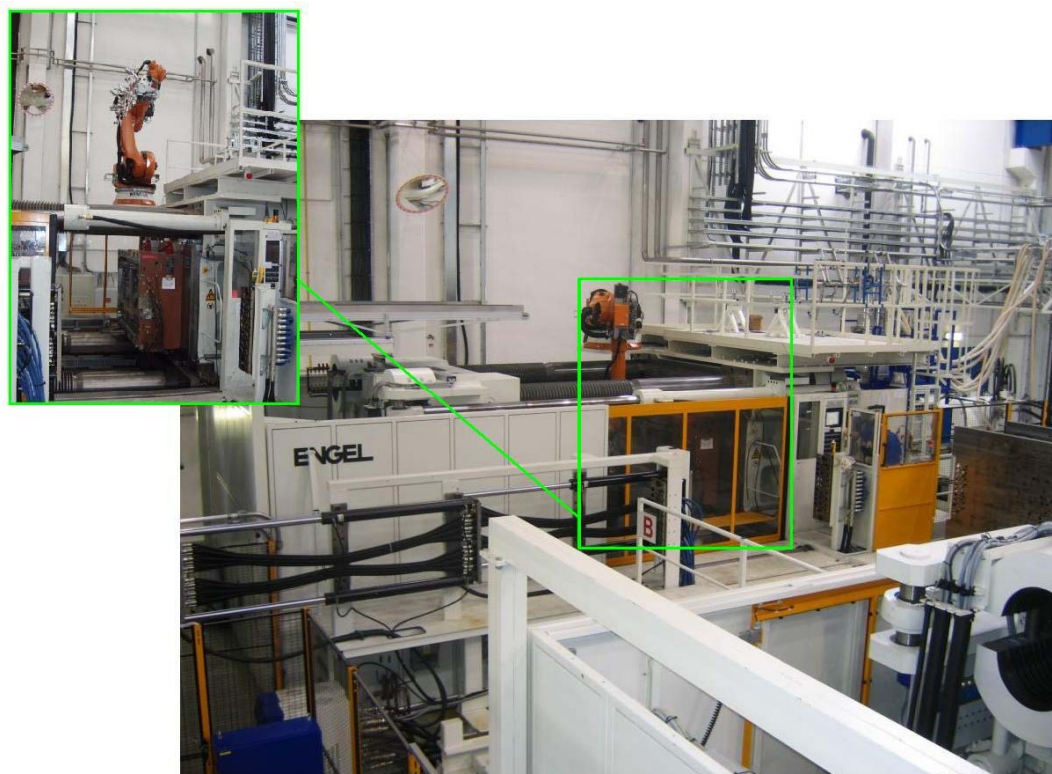
v tabulce 6. Odebírání výrobků z formy zajišťuje angulární robot KR C2 společnosti Kuka s řízením od firmy Remak, který výstřiky následně přemísťuje na dopravník.

Tab. 6. Technické parametry vstřikovacího stroje

Uzavírací jednotka		
Uzavírací síla	32 000	kN
Dráha otevírání	3 100	mm
Velikost upínacích desek (v x š)	2710 x 3130	mm
Světlost mezi sloupky (v x š)	1800 x 2240	mm
Maximální hmotnost nástroje	81 000	kg
Vstřikovací jednotka č.1, 2		
Průměr šneku	135	mm
Dráha dávkování	645	mm
Max. objem zdvihu	9230	cm ³
Max. otáčky šneku	85	min ⁻¹
Plastikační výkon	117	g·sec ⁻¹



Obr. 45. Vstřikovací jednotky vstřikovacího stroje



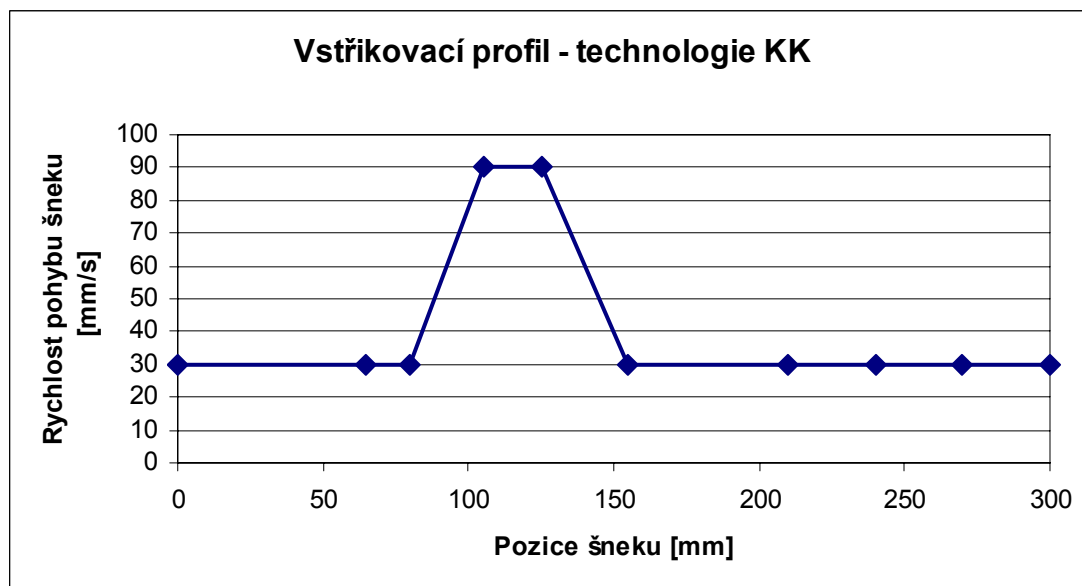
Obr. 46. Uzavírací jednotka vstřikovacího stroje

3.3.1 Nastavení technologických parametrů na stroji při vstřikování technologií konvenčního kaskádového vstřikování

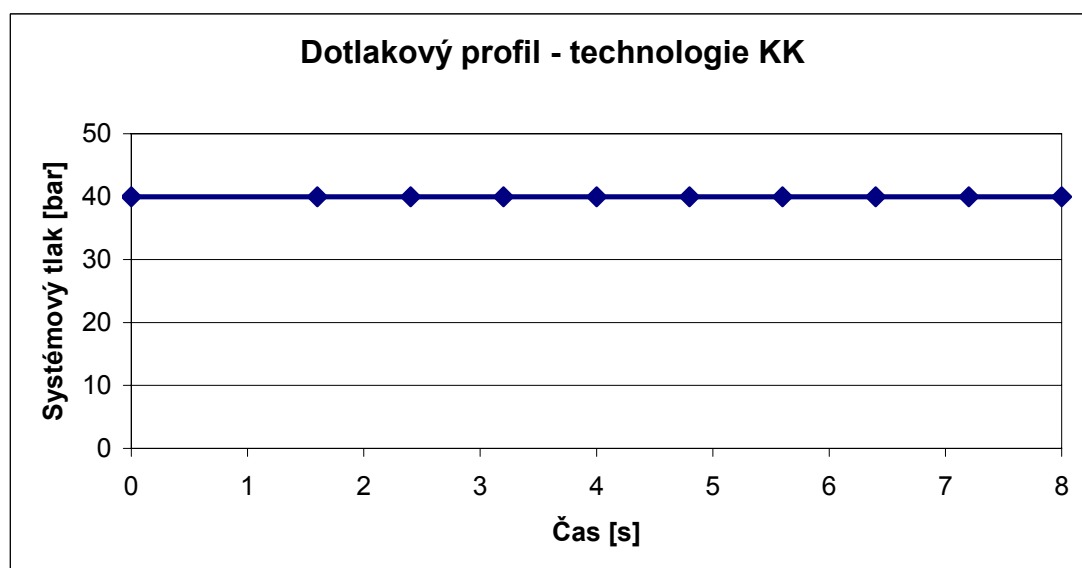
V případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování bylo k řízení vstřikovací fáze použito řízení stroje takzvaným „objemovým vstřikováním“, tedy řízení rychlosti pohybu šneku v závislosti na poloze šneku. Takovýto způsob řízení vstřikovacího procesu je u konvenční technologie vstřikování neoptimálnější. Vstřikovací proces využívající k řízení rychlost pohybu šneku není tak značně ovlivněn změnou viskozity taveniny, jako je tomu například u vstřikovacího procesu řízeného pomocí systémového tlaku v závislosti na dráze či čase (viz kap. 2.6.4).

Řídící jednotka stroje reguluje systémový tlak tak, aby bylo dosaženo nastaveného vstřikovacího profilu (viz obr. 47). Výše maximálního systémového tlaku byla omezena, a to na 149 bar.

Přepnutí na dotlak je řízeno v závislosti na poloze šneku a fáze dotlaku je řízena v závislosti systémového tlaku na čase (viz obr. 48). Hodnoty jednotlivých technologických parametrů jsou uvedeny v tabulce 7.



Obr. 47. Vstřikovací profil nastavený pro vstřikování pomocí technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK)



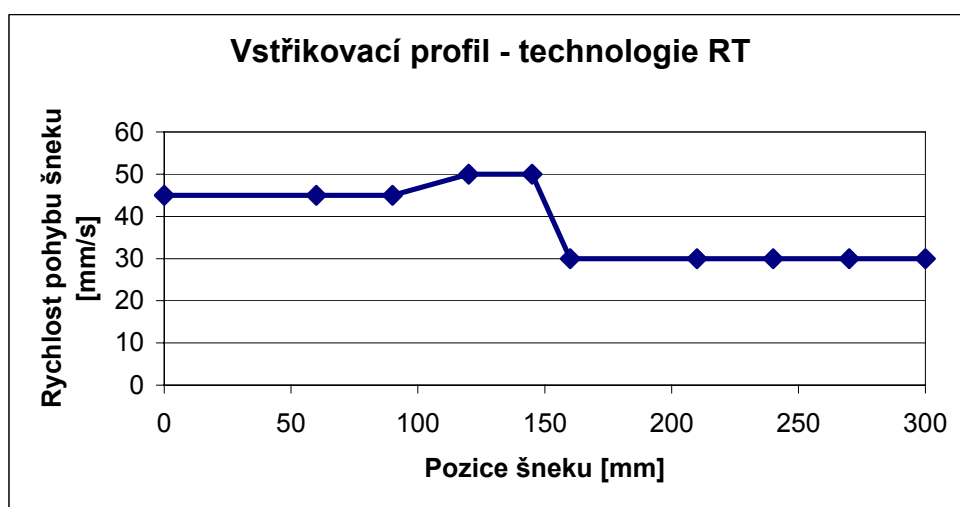
Obr. 48. Dotlakový profil nastavený pro vstřikování pomocí technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK)

Tab. 7. Nastavené technologické parametry na stroji při vstřikování pomocí technologie konvenčního kaskádového vstřikování

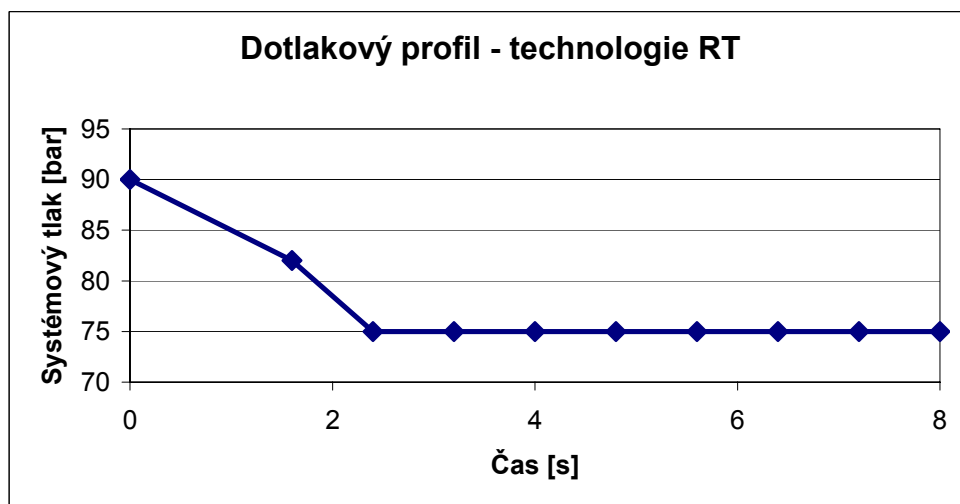
Teploty [°C]	
Pod násypkou	50
Válec	265-265-265-270- 270-270-270-270
Tryska vstřikovací jednotky	265
Horký rozvod	45x270
Teplota tvárnice	35
Teplota tvárníku	45
Časy [s]	
Vstřík	6,9
Dotlak	8,0
Plastikace	19,0
Chlazení	25,0
Cyklus	74,0
Dráhy [mm]	
Přepnutí na dotlak	40
Plastikace	300
Polštář	23
Ostatní	
Rychlost pohybu šneku	dle nastaveného vstřikovacího profilu
Dotlak	dle nastaveného dotlakového profilu
Uzavírací síla	28000 kN

3.3.2 Nastavení technologických parametrů na stroji při vstřikování technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

Stroj je při technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje řízen obdobně jako v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování kromě přepnutí na dotlakovou fázi, kdy je u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje využito přepnutí v závislosti na čase.



Obr. 49. Vstřikovací profil nastavený na stroji pro vstřikování pomocí technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)



Obr. 50. Dotlakový profil nastavený na stroji pro vstřikování pomocí technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

Průběh nastavení vstřikovacího profilu u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je zobrazen na obr. 49 a nastavený dotlakový profil zachycuje obr. 50. Nastavení vstřikovacího a dotlakového profilu na stroji nemá přímý vliv na samotný proces vstřikování. Stroj u této technologie působí pouze jako dodavatel taveniny pod určitým tlakem, přičemž tlak taveniny musí být vyšší, než je požadovaný tlak vycházející z referenčních tlakových křivek pro jednotlivé trysky.

Hodnoty jednotlivých technologických parametrů jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8. Nastavené technologické parametry na stroji při vstřikování pomocí technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

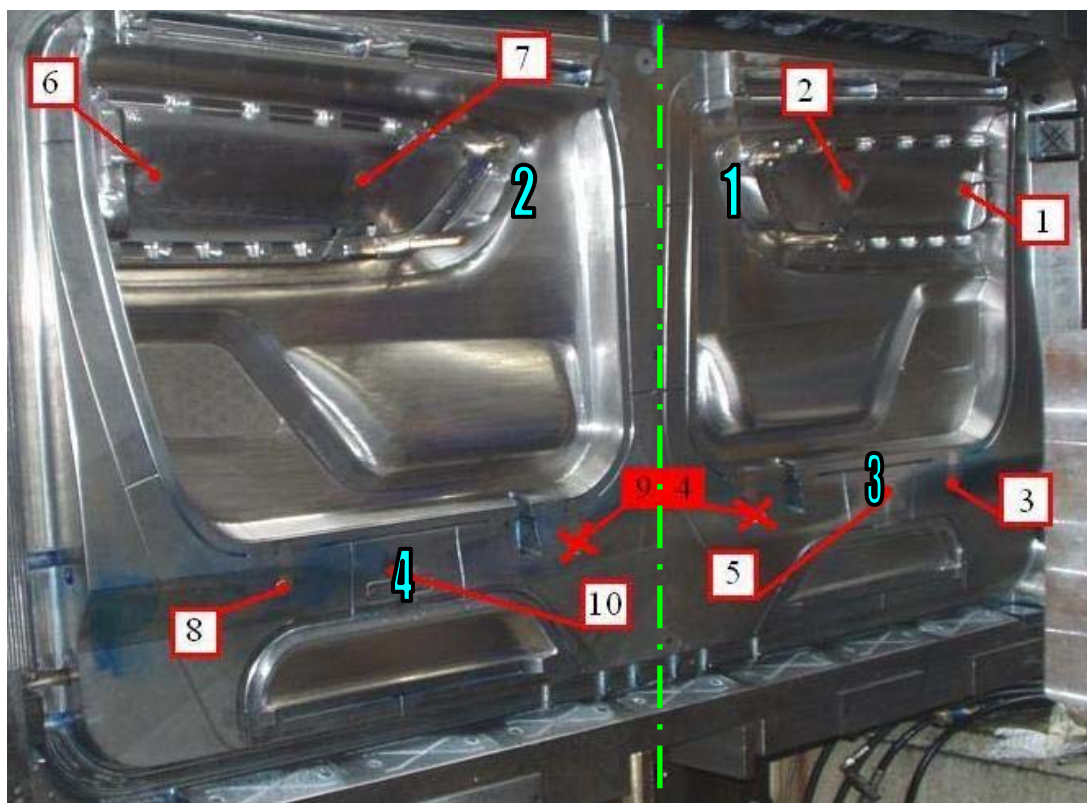
Teploty [°C]	
Pod násypkou	50
Válec	265-265-265-270- 270-270-270-270
Tryska vstřikovací jednotky	265
Horký rozvod	45x270
Teplota tvárnice	35
Teplota tvárníku	45
Časy [s]	
Vstřik	7,2
Dotlak	8,0
Plastikace	19,0
Přepnutí na dotlak	7,2
Chlazení	25,0
Cyklus	74,0
Dráhy [mm]	
Plastikace	300
Polštář	24
Ostatní	
Rychlost pohybu šneku	dle nastaveného vstřikovacího profilu
Dotlak	dle nastaveného dotlakového profilu
Uzavírací síla	28000 kN

3.3.3 Princip vstřikování výrobků a řízení otevírání trysek horkého rozvodu vstřikovacího nástroje

Dutiny vstřikovacího nástroje použitého v experimentu je možné na základě jejich symetričnosti rozdělit na dvě části, a to na polovinu nástroje, kterou tvoří dutiny 1 a 3, a zrcadlovou polovinu podle pomyslné vertikály uprostřed nástroje, obsahující dutiny 2 a 4 (viz obr. 51).

Plnění dutin zajišťuje osm horkých uzavíratelných trysek, jak bylo zmíněno v kapitole 3.2.

Na základě symetričnosti jsou dalším analýzám podrobeny dutiny 1 a 3, tedy dveřní výplň levá a k ní příslušná kapsa.



Obr. 51. Rozmístění trysek horkého rozvodu v dutinách vstřikovacího nástroje

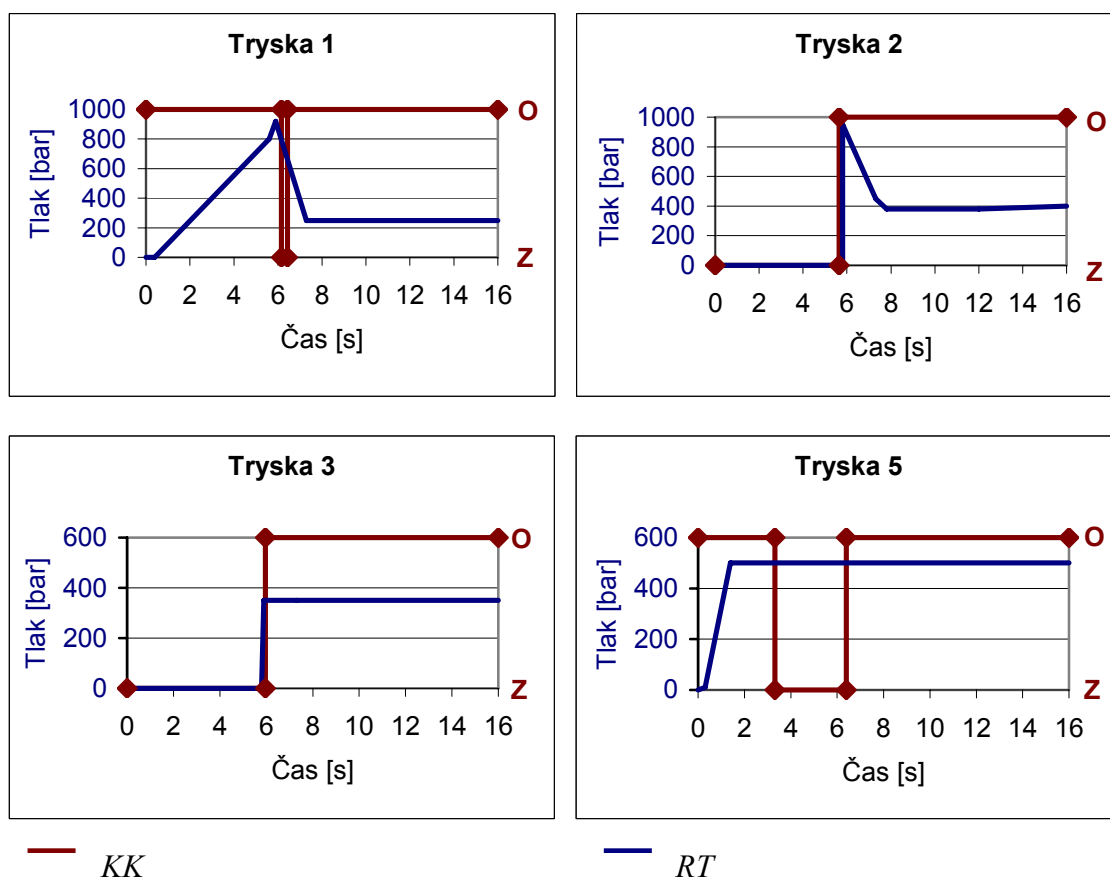
V případě konvenčního kaskádového vstřikování jsou uzavíratelné trysky horkého rozvodu vstřikovacího nástroje řízeny pomocí ovládacího software CC200 vstřikovacího stroje Engel a k pohybu jehel v tryskách je využito hydraulického systému vstřikovacího stroje.

Požadované otevírání a zavírání trysek je zadáváno jako funkce otevření či zavření trysky v závislosti na poloze šneku, viz tab. 9.

Tab. 9. Nastavení řízení trysek u konvenčního kaskádového vstřikování

Poloha šneku [mm]	Tryska			
	1	2	3	5
otevřít	310	125	100	310
zavřít	80	0	0	205
otevřít	60	x	x	60
zavřít	0	x	x	0

Pro porovnání s technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje jsou požadovaná otevření a zavření trysek přepočítána pomocí rychlostního vstřikovacího profilu na závislost řízení na čase a vynesena v obrázku 52.



Obr. 52. Řízení horkých trysek vtokového systému u technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

Při vstřikování pomocí technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je předchozí řízení vtokového systému konvenčního kaskádového vstřikování zcela odpojeno a k řízení je využito externí řídicí jednotky s hydraulickou jednotkou, viz obr. 33. U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je možné pomocí řídicí jednotky ovládat polohu jehly nejen binárně, tedy danou trysku otevřít či zavřít, ale je možné využít poloh mezi krajními polohami, a tím regulovat tlak taveniny tak, aby odpovídal zadané referenční křivce tlakového profilu v závislosti na čase pro danou trysku.

Otevírání jednotlivých trysek horkého rozvodu je tedy u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje řízeno v závislosti tlaku taveniny na čase, zatímco u konvenčního kaskádového vstřikování je otevírání kaskád řízeno v závislosti na poloze šneku.

Porovnání nastavení řízení horkých trysek pro oba způsoby řízení je znázorněno v obr. 52. Požadované hodnoty byly zadávány tak, aby plnění dutiny pomocí obou technologií bylo principiálně obdobné.

3.4 Softwarové simulace procesu plnění

Pro softwarové simulace byl využit software Moldflow Plastics Insight 6.1. Software umožňuje analyzovat detailně vstřikovací proces včetně vstřikování pomocí konvenčního kaskádového vstřikování a technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

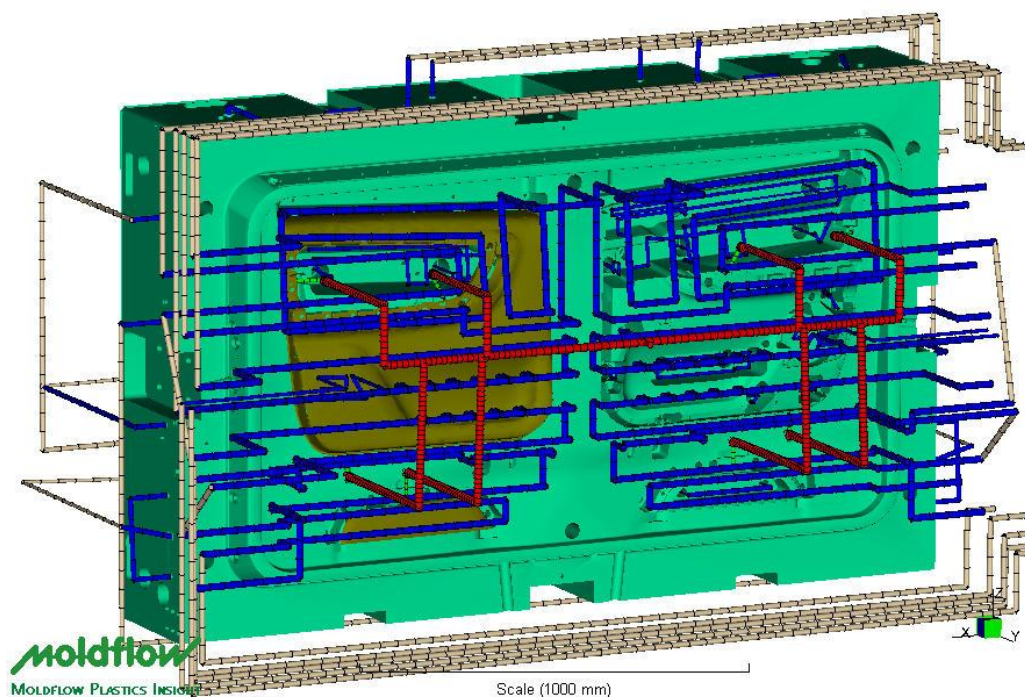
Model připravený pro simulace je zachycen na obr. 53 a odpovídá reálnému vstřikovacímu nástroji. Model se skládá z horkého rozvodu, temperačních kanálů, vstřikovacího nástroje a samozřejmě z modelů pro samotnou dvevní výplň a kapsu.

Plnění dutin za reálných podmínek a podmínek simulovaných pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje v různých časech je znázorněno na obr. 54, 55 a 56.

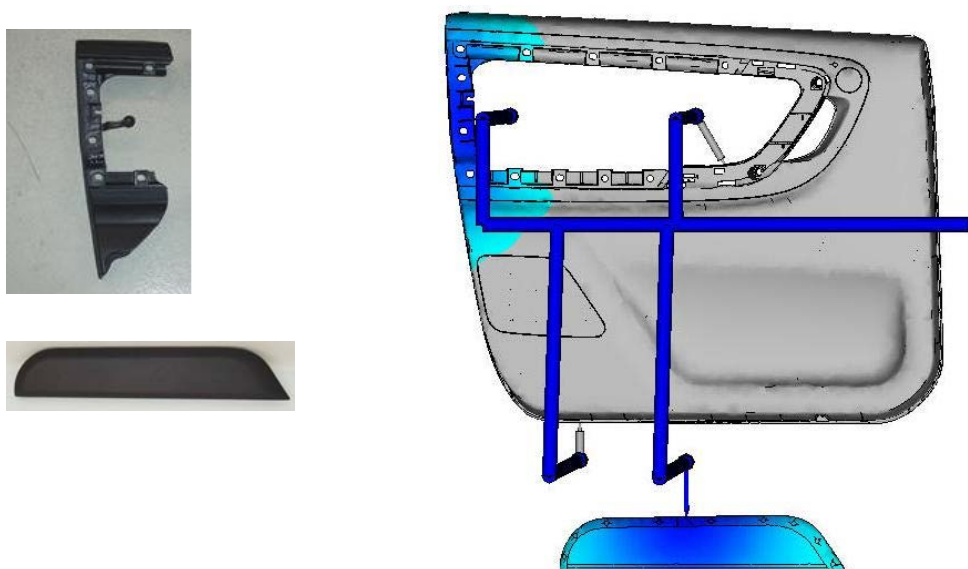
Stejně porovnání s obdobnou přesností bylo získáno pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování.

Z obrázku je zřejmé, že vstřikování výrobků dvevní výplně a kapsy probíhá současně. Přibližně v okamžiku 2,3 s se tavenina plastu dostává do kritické oblasti výrobku, kterou je oblast integrované mřížky reproduktoru. Po otevření trysek 2 a 3 dojde ke vzniku esovitého profilu čela taveniny zachyceného na obrázku 55 v čase

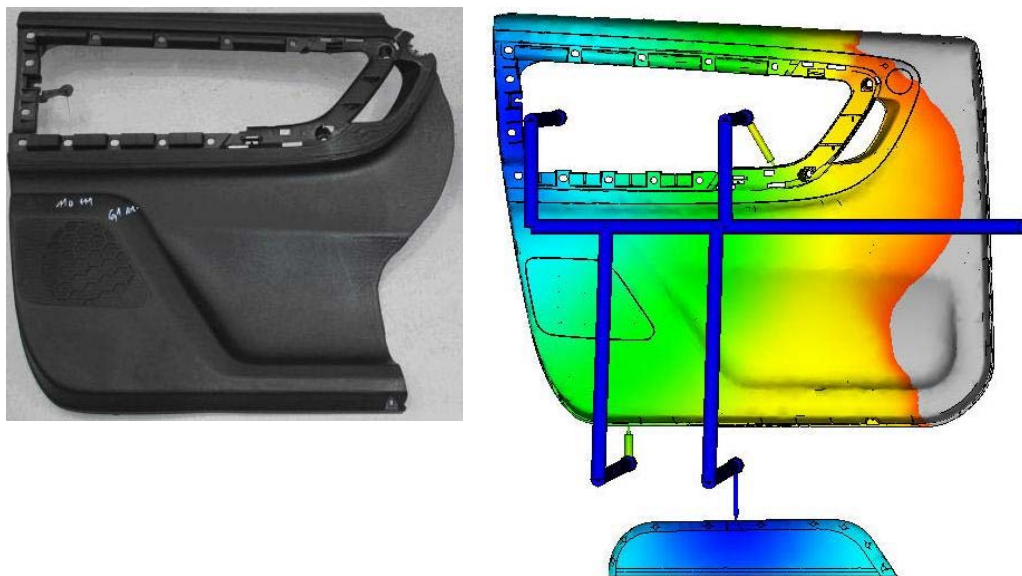
6,1 s. Tavenina dále dosáhne hrany dutiny 1 přibližně v polovině a pak dochází k plnění horního a spodního rohu výrobku, přičemž posledním místem plnění výstřiku je spodní roh.



Obr. 53. Model pro softwarovou simulaci



Obr. 54. Porovnání plnění dutiny za reálných a simulovaných podmínek pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje v čase 2,3 s



Obr. 55. Porovnání plnění dutiny za reálných a simulovaných podmínek pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje v čase 6,1 s



Obr. 56. Porovnání plnění dutiny za reálných a simulovaných podmínek pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje v čase 15,2 s

3.5 Snímání tlaku v dutině nástroje

Tlak v dutině nástroje byl při experimentálních měřeních snímán metodou přímého měření (viz kapitola 2.8) využitím tlakového snímače 6151C od firmy Kistler (viz obr. 57). Technické



Obr. 57. Piezoelektrický tlakový snímač 6151C

parametry snímače jsou uvedeny v tabulce 10. Snímač pracuje na piezoelektrickém principu. Tlakový snímač byl instalován do tvárníkové části dutiny 1 nástroje, tedy do nevzhledové strany výrobku (viz obr. 58).



Obr. 58. Poloha tlakového snímače umístěného na nevzhledové straně levé zadní dveřní výplně

Tab. 10. Technické parametry tlakového snímače 6151C [38]

Rozsah	0-2 000	bar
Max. přetížení	2 500	bar
Citlivost	9,4	pC/bar

3.6 Rozbor vstřikovacího procesu

Pro analyzování vstřikovacího procesu byl pro obě technologie během experimentů snímán systémový tlak, poloha šneku a tlak v dutině 1 v závislosti na čase. Hodnoty snímaných veličin byly zaznamenávány řídicím softwarem CC200 vstřikovacího stroje Engel v intervalech 0,04 s.

Vstřikovány byly vždy tři série po 35 za sebou jdoucích zdvích pro každou technologii. Jednotlivé série se od sebe lišily druhem vstřikovaného materiálu popsaného v kapitole 3.1.

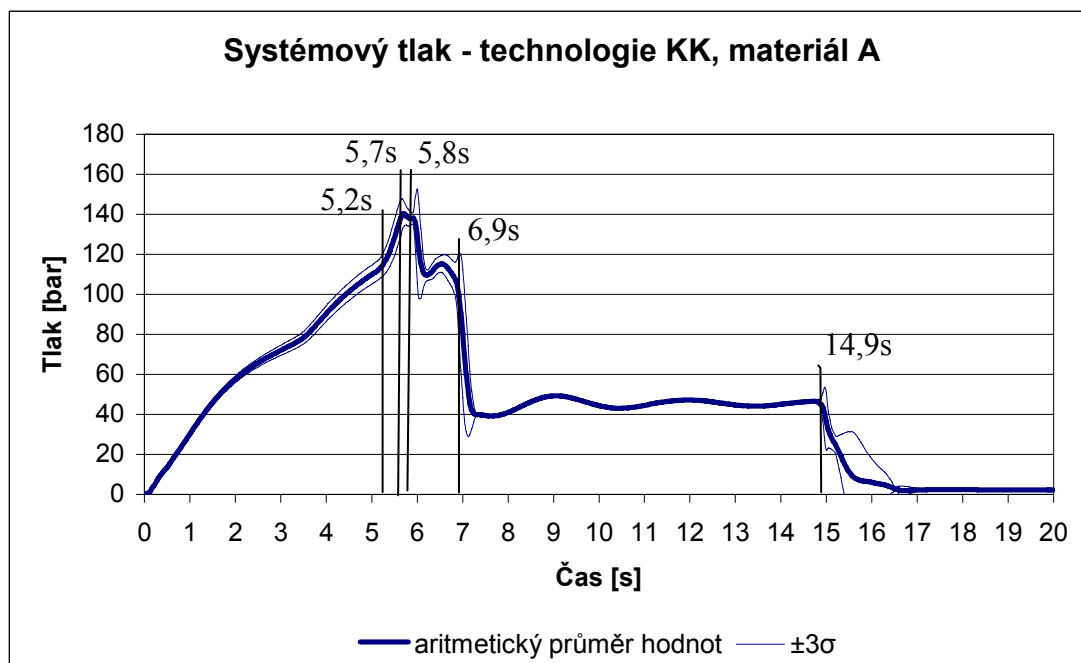
Průběhy snímaných parametrů v sériích jsou v grafech zobrazeny pro přehlednost pomocí aritmetických průměrů hodnot průběhů plnou tlustou čarou. Plné tenké čáry pak znázorňují hraniční křivky představující hodnoty $\pm 3 \cdot \sigma$, kde σ je výběrová směrodatná odchylka. Oblast tří sigma určuje pásmo, ve kterém se naměřené průběhy snímaných parametrů jednotlivých zdvihů vyskytují s pravděpodobností 99,73 %.

3.6.1 Rozbor vstřikovacího procesu technologie konvenčního kaskádového vstřikování

Průběh systémového tlaku u vstřikování technologií konvenčního kaskádového vstřikování s materiálem A, tedy plastem složeným z materiálu Daplen EE137HP s příměsí 3 % barviva Onyx 10-9816F/PP, je až do otevření trysky 2 v čase 5,7 s možné rozdělit do dvou částí přibližně lineárního charakteru (viz obr. 59). Ke změně směrnice přímky dochází v čase 5,2 s, což odpovídá času, ve kterém začíná nárůst rychlosti pohybu šneku dle požadovaného vstřikovacího profilu, viz kapitola 3.3.1. Vyšší rychlost pohybu šneku je zde nastavena tak, aby bylo co možná nejvíce zabráněno tlakovým poklesům taveniny způsobeným otevřením trysky 2 a následně trysky 3.

Po otevření trysky 2 v čase 5,7 s se růst systémového tlaku zastaví a do času 5,8 s, kdy se otevře tryska 3, má konstantní hodnotu 138 bar. Následuje pokles systémového tlaku a řídicí systém stroje zvyšuje systémový tlak, aby dosáhl požadované rychlosti pohybu šneku. Vstřikovací fáze končí v čase 6,9 s. V okamžiku přepnutí vstřikovací fáze na fázi dotlakovou systémový tlak opět prudce klesá až na

hodnotu přibližně 45 bar, která je udržována až do ukončení dotlakové fáze v čase 14,9 s.

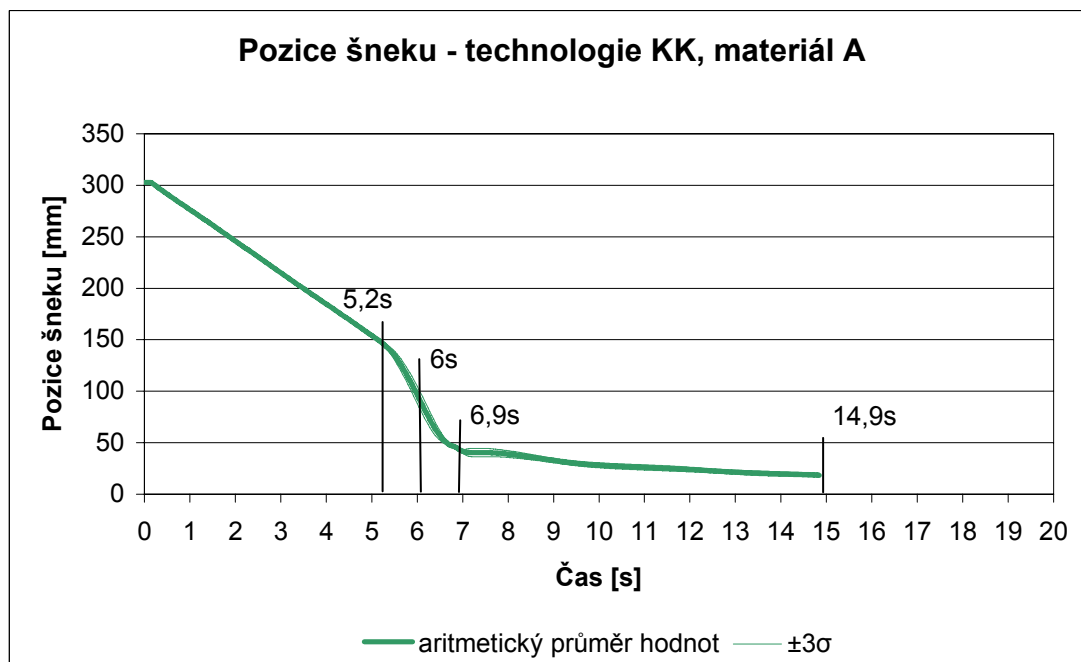


Obr. 59. Průběh systémového tlaku u technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK), materiál A

V obr. 60 je vynesena závislost polohy šneku na čase. Tato závislost je z pohledu vstřikování plastů velmi významná, neboť je možné na základě takového grafu analyzovat změny rychlosti pohybu šneku a tím podmínky plnění dutiny.

Dráha plastikace je 300 mm a z této polohy tedy začíná i fáze vstřiku, šnek se v závislosti na čase přibližuje axiálně ke vstřikovací trysce. Maximální polohy 0 mm však nedosáhne, protože plnění dutiny taveninou je ukončeno na poloze 23 mm. Objem taveniny, který zůstane před šnekem po ukončení plnění, se nazývá polštář.

Křivka polohy šneku v závislosti na čase klesá lineárně až do času 5,2 s, kdy začne docházet ke zvyšování rychlosti pohybu šneku z 30 na 90 mm/s, a tedy k většímu poklesu křivky pozice šneku. Začátkem doby otevření trysek 2 a následně 3 křivka razantně klesá z důvodu dosažení maximální nastavené rychlosti pohybu šneku a po čase 6 s se pokles zmírní vlivem změny rychlosti pohybu šneku zpět z 90 na 30 mm/s. V čase 6,9 s dojde na poloze 40 mm k přepnutí na fázi dotlaku a poloha šneku konstantně klesá až do ukončení plnění dutiny taveninou v čase 14,9 s, kdy pohyb šneku ustane na poloze 23 mm.



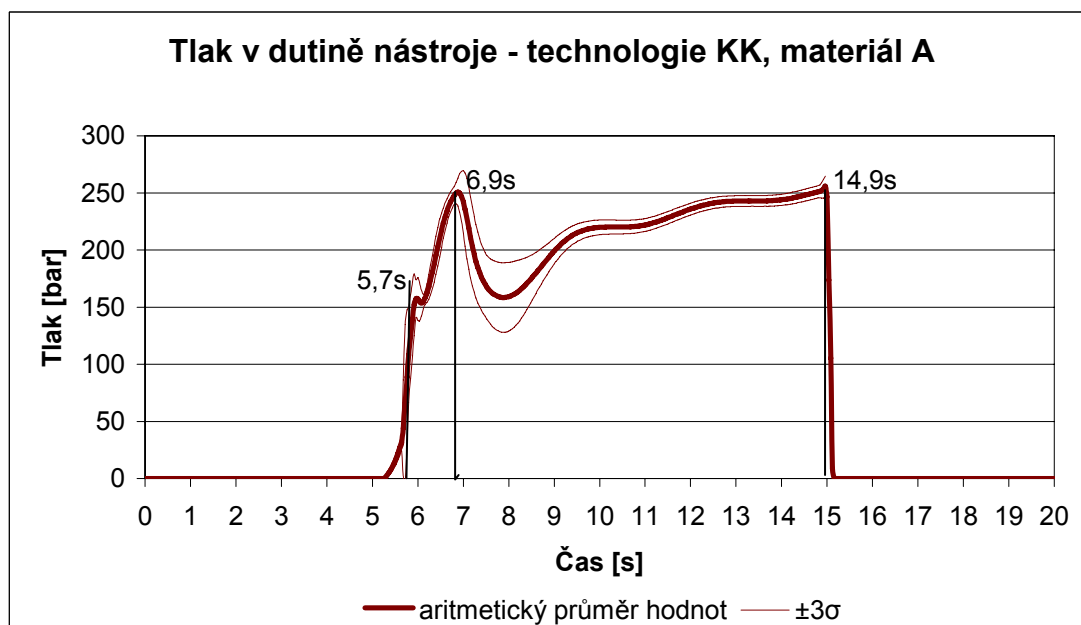
Obr. 60. Průběh pozice šneku u technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK), materiál A

Tlak v dutině formy je dán tlakem, který vyvodí na taveninu čelo šneku uvnitř tavící komory, označovaný jako vnější tlak, a řízením trysek horkého rozvodu. Každá změna v rychlosti pohybu šneku se přímo projeví na průběhu tlaku v dutině nástroje.

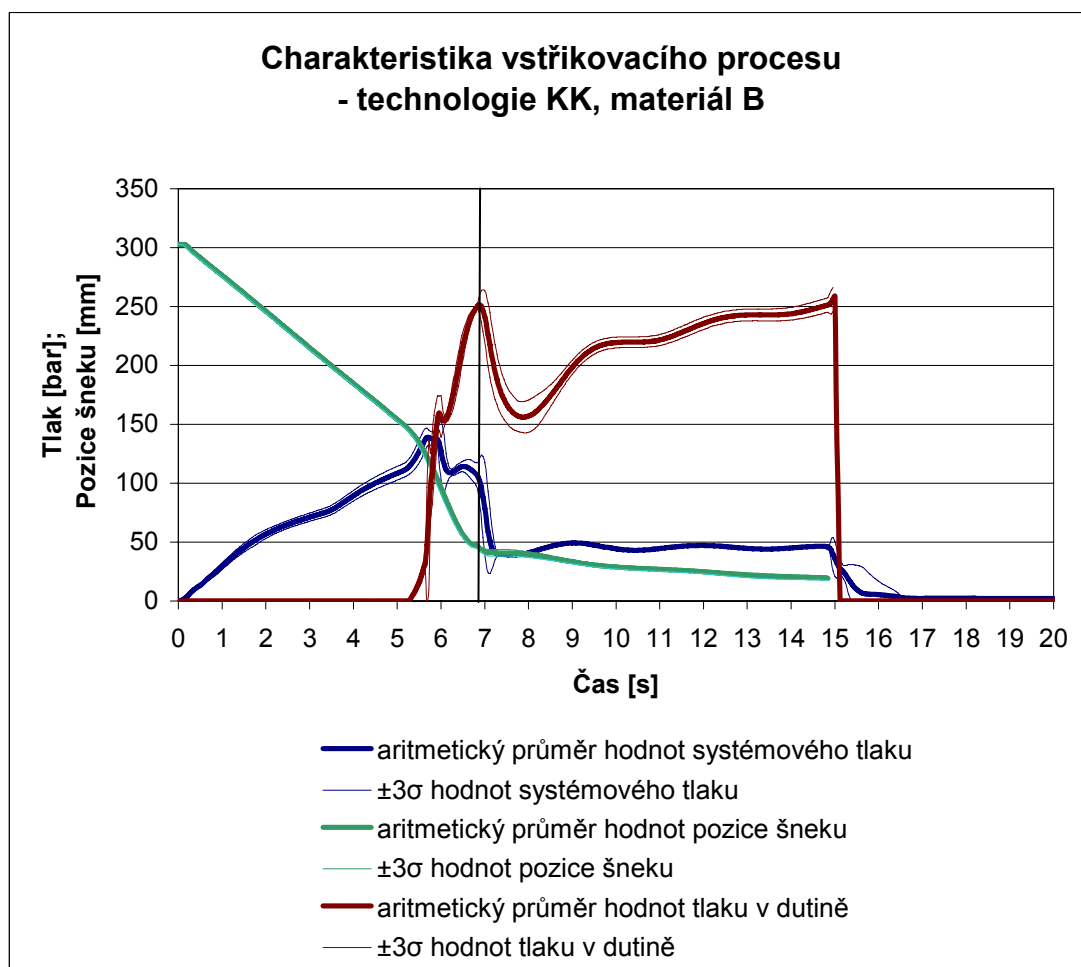
Průběhy tlaku v dutině nástroje měřené během vstřikování různých sérií umožňují získat představu o vlastnostech budoucího výrobku a stabilitě procesu.

Nárůst vnitřního tlaku v dutině nástroje je ovlivněn vzdáleností polohy snímače tlaku od vtoku, respektive délkou dráhy toku taveniny k měřenému místu, přičemž se zvětšující se vzdáleností se zvětšuje časové zpoždění nárůstu tlaku a klesají naměřené hodnoty tlaku v dutině v měřeném místě.

V čase 5,3 s se začne zvyšovat tlak v dutině nástroje v měřeném místě (viz obr. 61). Po dosažení tlaku přibližně 150 bar v čase 5,7 s dochází ke kmitu průběhu tlaku vlivem otevření trysek 2 a 3.



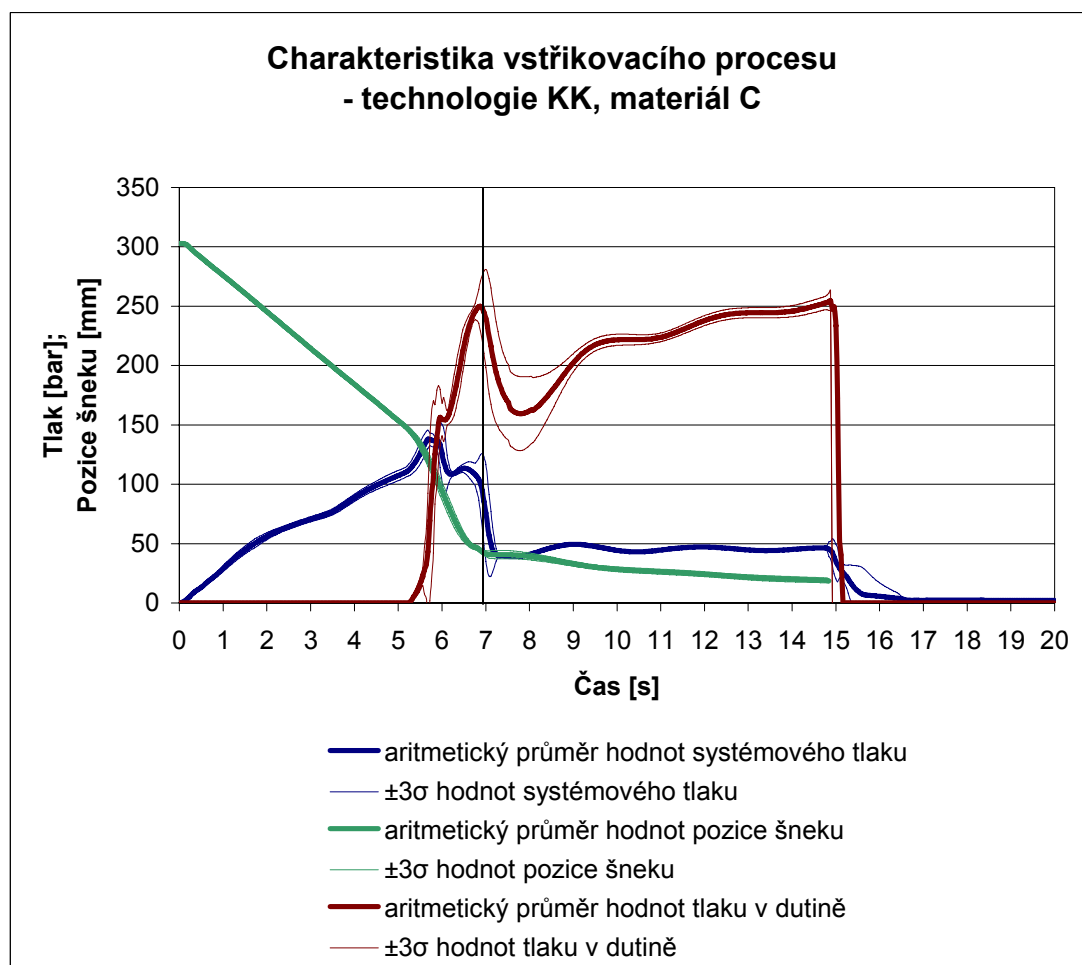
Obr. 61. Průběh vnitřního tlaku u technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK), materiál A



Obr. 62. Charakteristika vstřikovacího procesu technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK), materiál B

V době 6,9 s dochází k poklesu tlaku v dutině nástroje v daném místě vlivem přepnutí vstřikovací fáze na fázi dotlakovou, přičemž tlakové průběhy jednotlivých zdvihů vykazují v tomto časovém úseku značnou variabilitu zapříčiněnou neřízenou změnou tlaku taveniny při změně způsobu řízení plnicího procesu, kdy je ve fázi dotlaku proces řízen v závislosti požadovaných hodnot systémového tlaku na čase. Následně se průběhy tlaku ustalují a na konci fáze dotlaku jsou téměř totožné.

Stejným způsobem byl analyzován i vstřikovací proces s materiálem B, tvořeným materiálem Daplen EE137HP s příměsí 3 % barviva Silbergrau, a materiálem C, skládajícím se z 67 % materiálu Daplen EE137HP, 3 % barviva Onyx a 30 % regranulátu materiálu Daplen EE137HP. U těchto sérií byly zaznamenány obdobné průběhy měřených hodnot v závislosti na čase, viz obr. 62 pro materiál B a obr. 63 pro materiál C. Pro přehlednost je v grafech vyznačen čas 6,9 s, který rozděluje vstřikovací proces na fázi vstřikovací a fázi dotlakovou.

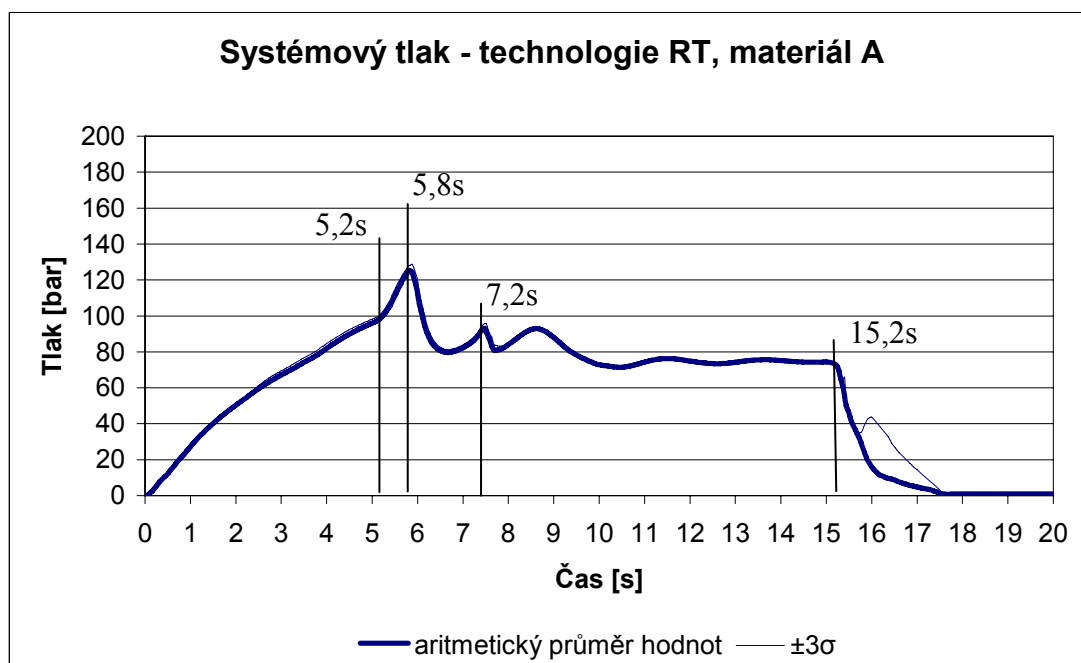


Obr. 63. Charakteristika vstřikovacího procesu technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK), materiál C

3.6.2 Rozbor vstřikovacího procesu technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

Nárůst systémového tlaku u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje při vstřikování s materiálem A začíná ihned od okamžiku počátku vstřikování (viz obr. 64) jako u technologie konvenčního kaskádového vstřikování. Počáteční fázi trvající 5,8 s, ve které má systémový tlak rostoucí tendenci, lze rozdělit do dvou etap. Obě etapy mají téměř lineární charakter, ale odlišují se strmostí přírůstku hodnot, směrnici přímkou. Hraniční bod mezi oběma etapami je určen časem 5,2 s, kdy dle nastavení vstřikovacího profilu (viz kapitola 3.3.2) dochází k téměř 60 % nárůstu rychlosti pohybu šneku.

Svého maxima dosahuje systémový tlak v okamžiku, kdy dochází k otevření trysky 2 v čase 5,8 s a následně trysky 3 v čase 5,9 s. Pokles systémového tlaku odpovídá nastavenému poklesu rychlosti pohybu šneku. Systémový tlak klesá cca 1 sekundu a pak dochází k jeho vzrůstu s maximem v čase 7,2 s. Vzrůst je zapříčiněn nastavením vyšší rychlosti pohybu šneku, než byla potřebná pro dodání dostatečného množství taveniny pod tlakem.



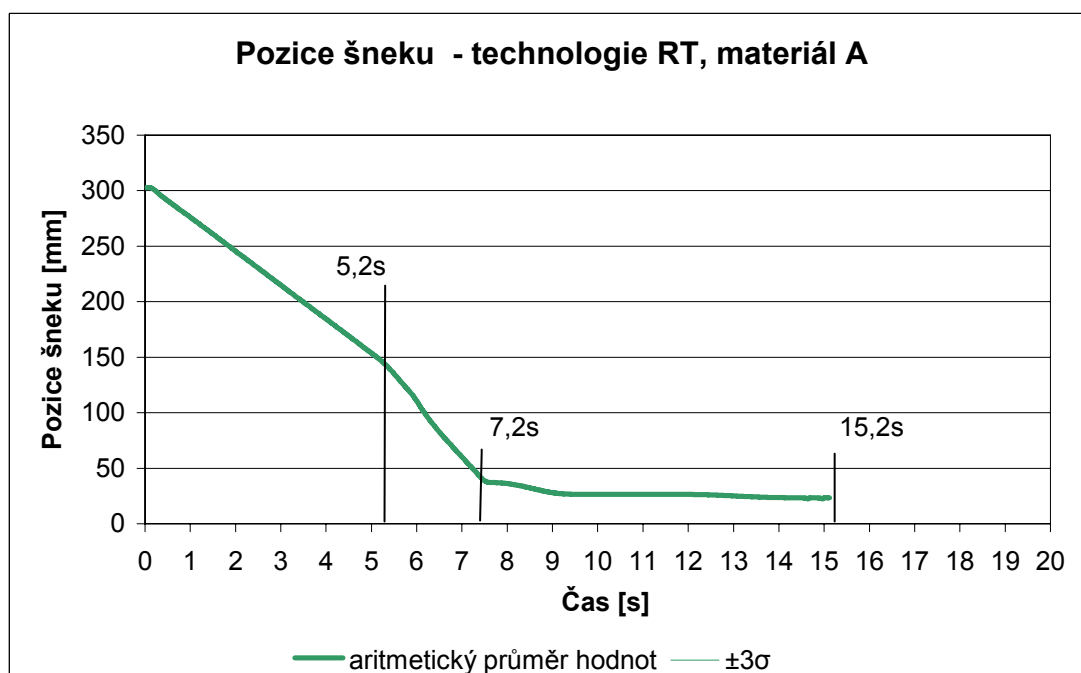
Obr. 64. Průběh systémového tlaku u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), materiál A

V čase 7,2 s dojde k simulovanému přepnutí na dotlak, kdy je nastavena na tlakových křivkách pro jednotlivé trysky hodnota tlaku odpovídající potřebnému dotlaku. Systémový tlak klesá až na hodnotu 75 bar, která je postačující pro udržení nastaveného tlaku taveniny na jednotlivých tryskách ve fázi dotlaku.

V čase 15,2 s je dotlaková fáze ukončena a následuje plastikace nové dávky paralelně s chlazením, otevření formy a vyjmutí výstřiku.

Vzhledem k řízení vstřikovacího procesu ve vtokovém systému horkého rozvodu ve vstřikovacím nástroji není možné ze systémového tlaku zcela usuzovat na děje v dutině nástroje.

Poloha šneku v závislosti na čase (viz obr. 65) má až do času 5,2 s lineární průběh, následuje prudší lineární klesání křivky jako důsledek nastavené vyšší rychlosti pohybu šneku. Bod přepnutí na dotlak v 7,2 s odpovídá poloze šneku 39 mm a následuje stlačování taveniny čelem šneku až do doby 15,2 s, kdy se šnek nachází na pozici 24 mm.



Obr. 65. Průběh pozice šneku u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), materiál A

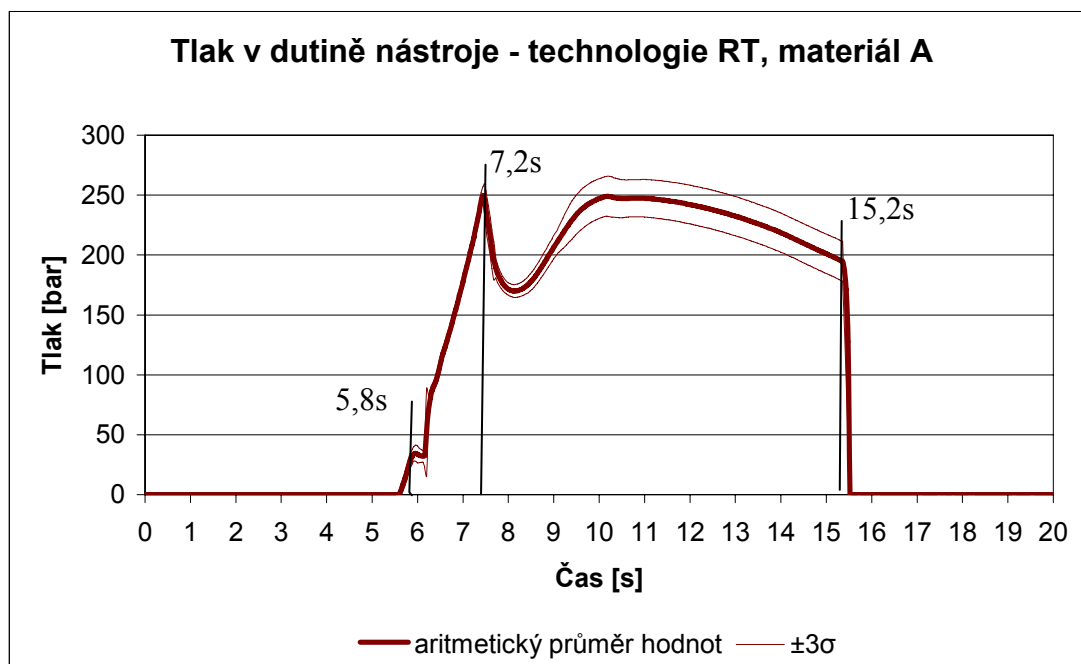
Tlak v dutině nástroje v měřeném místě začne vzrůstat v čase 5,5 s (viz obr. 66). Po otevření trysky 2 v čase 5,8 s a následně trysky 3 v čase 5,9 s dojde k mírnému kmitu tlaku taveniny, ale jeho následný průběh ve fázi vstřikování je opět lineární. Další pokles vnitřního tlaku následuje až v okamžiku ukončení vstřikovací

fáze a přepnutí na dotlakovou fázi v čase 7,2 s. Technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje zajišťuje jemnou korekci tlaku taveniny na jednotlivých tryskách minimální variabilitu průběhů tlaku jednotlivých zdvihů při přepnutí na dotlakovou fázi.

Nárůst tlaku uvnitř dutiny formy na začátku fáze dotlaku vychází z principu přepnutí na dotlak simulovaného nastavením průběhů referenčních tlakových křivek pro jednotlivé trysky horkého vtokového systému. Maximální hodnota vnitřního tlaku dosahuje 250 bar, což odpovídá maximu ve fázi vstřikování, a je jí dosaženo přibližně po 10 sekundách od začátku vstřikování.

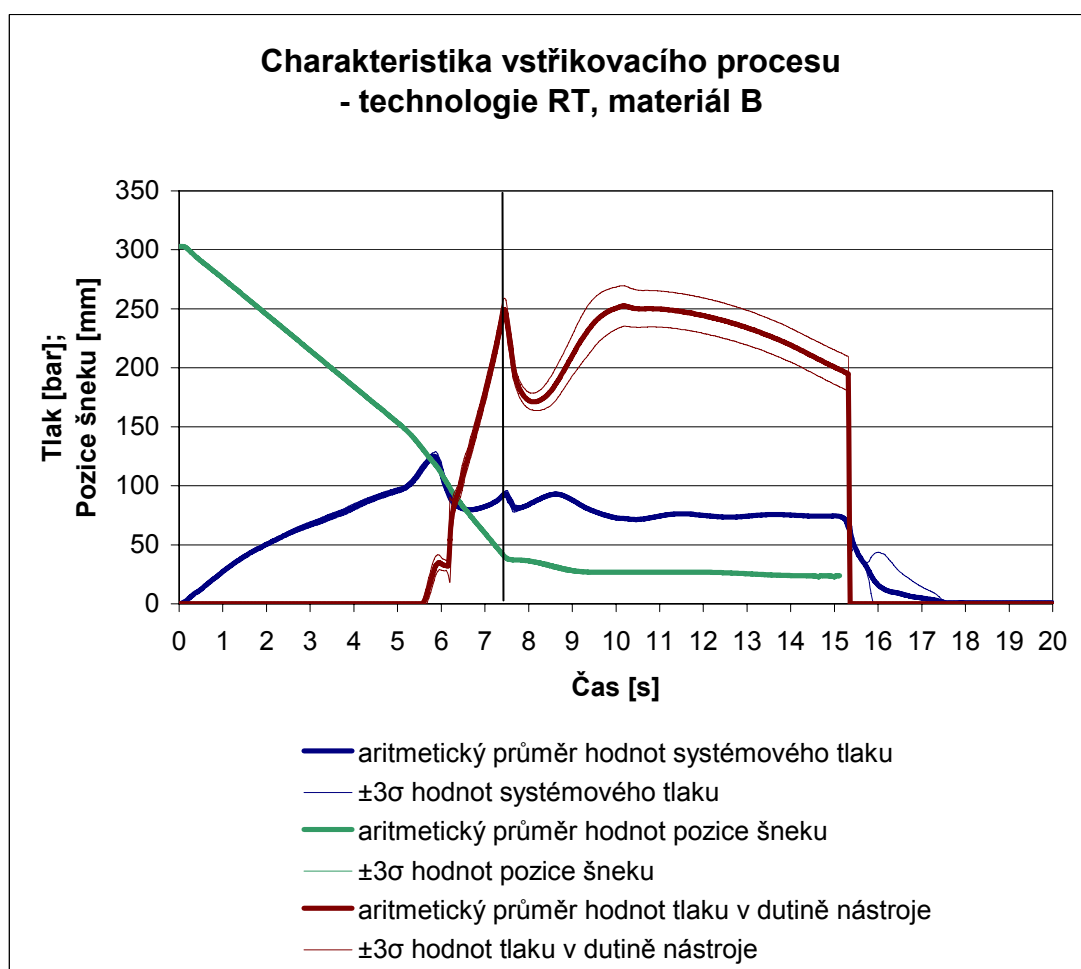
Jakmile začne stoupat tlak v dutině nástroje po simulovaném přepnutí na dotlak, dochází ke značné variabilitě průběhů vnitřního tlaku jednotlivých zdvihů. Příčinou je zřejmě nevhodnost způsobu řízení systému, kdy je proces řízen závislostí požadovaného tlaku taveniny na dané trysce horkého rozvodu na čase. Systém nedokáže korigovat změny vlastností taveniny zapříčiněné reologickým chováním tavenin plastů, a to především změn viskozity v závislosti na teplotě, respektive smykové rychlosti.

V čase 15,2 s je proces plnění dutiny ukončen a dochází k poklesu tlaku v dutině nástroje.

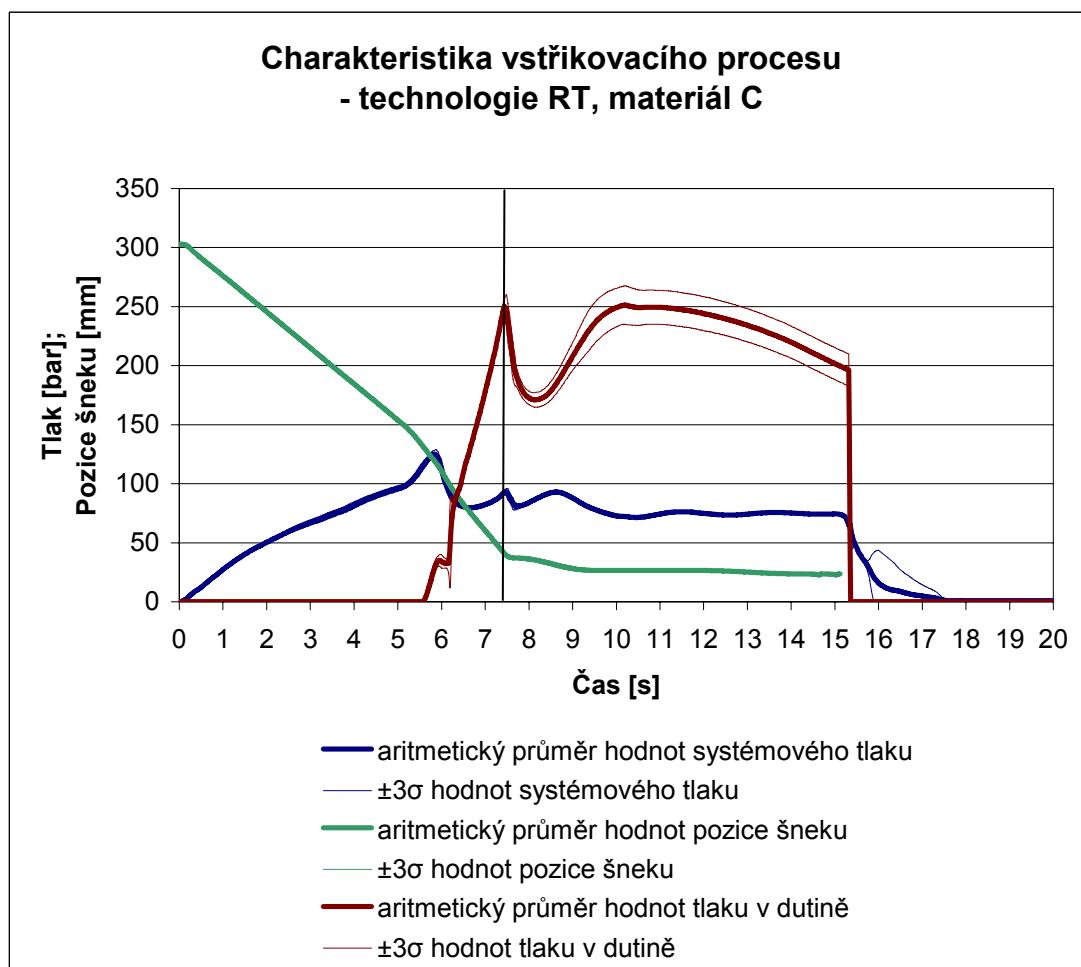


Obr. 66. Průběh vnitřního tlaku u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), materiál A

Při vstřikování pomocí technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje byly rovněž vstřikovány série s dalšími dvěma materiály B a C jako v případě analyzování technologie konvenčního kaskádového vstřikování. Časové průběhy parametrů mají obdobné závislosti, jako byly popsány výše u materiálu A. U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje docházelo k přepnutí na dotlak v čase 7,2 s, tento čas je zaznamenán v obr. 67 pro charakteristiku vstřikovacího procesu s materiálem B a obr. 68 pro vstřikovací proces s materiálem C.



Obr. 67. Charakteristika vstřikovacího procesu technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), materiál B



Obr. 68. Charakteristika vstřikovacího procesu technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), materiál C

3.6.3 Porovnání průběhů vnitřních tlaků v dutině nástroje během vstřikovacího procesu

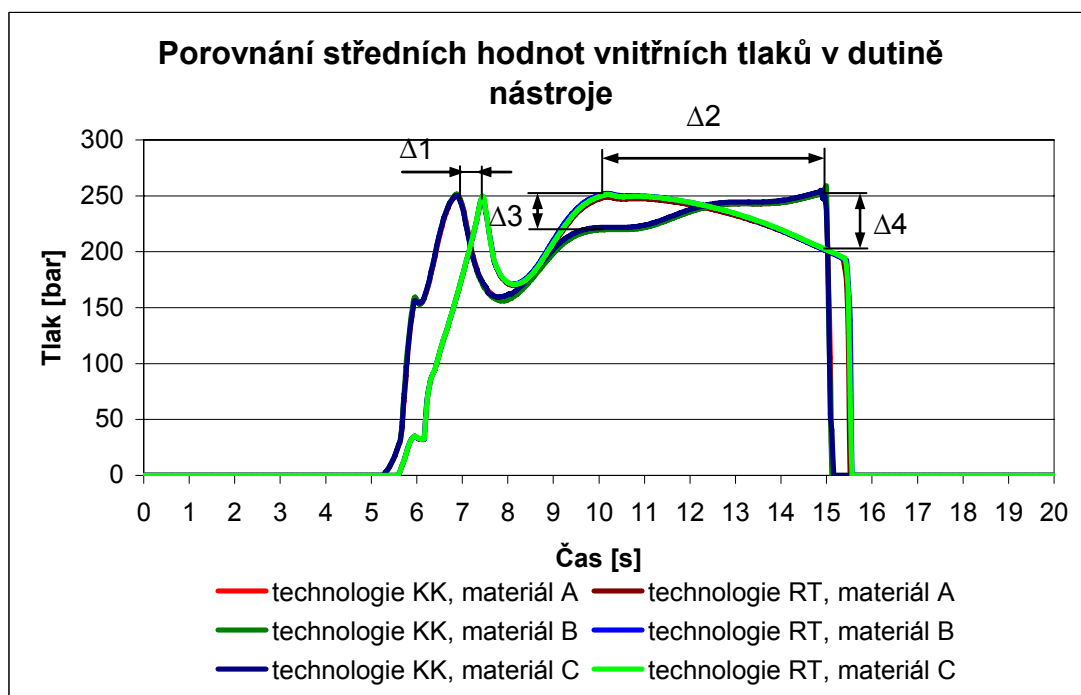
Vzájemné porovnání průběhů středních hodnot vnitřních tlaků v dutině nástroje všech sérií je zobrazeno v obr. 69. Nárůst vnitřního tlaku u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je opožděn o 0,23 s, což je zapříčiněno odlišností řízení vstřikovacího procesu obou technologií. V čase kolem 6 s dochází k poklesu tlaku taveniny způsobeného otevřením trysek 2 a 3 a následuje další zvyšování tlaku.

K přepnutí na dotlak dojde u konvenčního kaskádového vstřikování v čase 6,9 s. U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je přepnutí na dotlak řízeno podle času 7,2 s. Vzájemné posunutí momentu

přepnutí na dotlakovou fázi u obou technologií je v obr. 69 označeno kótou $\Delta 1$. Okamžik přepnutí u obou technologií odpovídá tlaku přibližně 250 bar. Po přepnutí na dotlak následuje pokles tlaku, kde jeho minimální hodnota je u konvenčního kaskádového vstřikování přibližně o 10 bar nižší, než hodnota minima dosažená u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

Dotlaková fáze trvá u obou technologií 8 s. U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je proces plnění delší o 0,3 s oproti technologii konvenčního kaskádového vstřikování, což je způsobené rozdílnou délkou doby vstřiku.

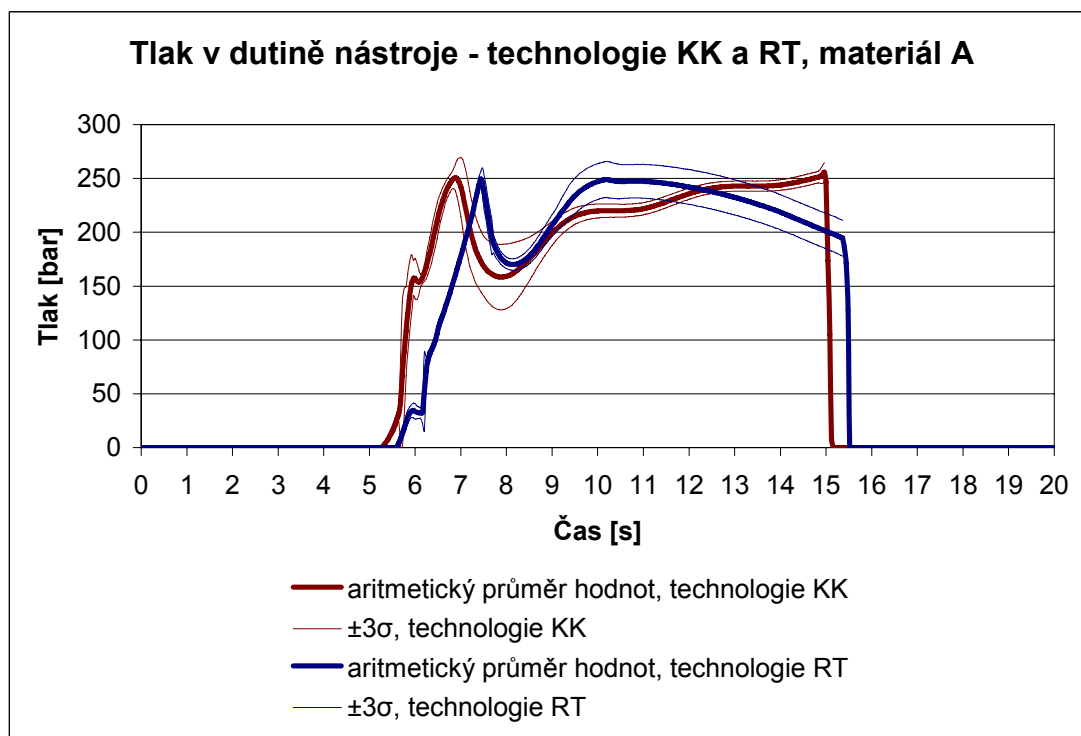
Vliv různých barviv a přidání regranulátu k základnímu materiálu na průběhy středních hodnot tlaku uvnitř dutiny formy je ve fázi vstřiku minimální. Ve fázi dotlaku je možné zaznamenat jemnou variabilitu středních hodnot průběhů tlaků jednotlivých sérií, která je u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje výraznější s rozdíly do ± 5 bar.



Obr. 69. *Vzájemné porovnání středních hodnot průběhů vnitřních tlaků naměřených při vstřikování pomocí technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), s materiály A, B a C*

Maximální hodnoty tlaků uvnitř dutiny formy ve fázi dotlaku dosahují obdobných maximálních hodnot jako ve vstřikovací fázi. U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je ve fázi dotlaku dosaženo maximálního tlaku 252 bar v čase 10,2 s, zatímco u technologie konvenčního kaskádového vstřikování je hodnota tlaku v dutině nástroje v tomto čase o 13 % nižší (viz $\Delta 3$ v obr. 69) a dosahuje svého maxima až v čase 14,9 s s tlakem 258 bar, což je tlak o 23 % vyšší, než je v dutině nástroje v tomto čase u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (viz $\Delta 4$ v obr. 69). Vzájemná pozice maxim dosažených oběma technologiemi ve fázi dotlaku je označena kótou $\Delta 2$ a představuje časový úsek 4,7 s.

Obrázek 70 znázorňuje vzájemné porovnání tlaků v dutině nástroje u obou technologií v případě sérií s materiálem A. Fáze vstřiku je z pohledu průběhu tlaku v dutině nástroje stabilnější u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje než u technologie konvenčního kaskádového vstřikování.



Obr. 70. Vzájemné porovnání průběhů tlaků v dutině nástroje naměřených při vstřikování pomocí technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), s materiálem A

Tlak taveniny není v okamžiku přepnutí na fázi dotlaku u technologie konvenčního kaskádového vstřikování přímo řízen, což přináší tlakové rozdíly až ± 30 bar v tomto okamžiku, zatímco u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje jsou rozdíly v době simulovaného přepnutí na dotlak do ± 7 bar. Přibližně 2 s po přepnutí na dotlak vykazují tlakové průběhy jednotlivých sérií minimální rozdíly mezi jednotlivými zdvihy u obou technologií. Další průběh tlaku v dutině nástroje jednotlivých zdvihů ve fázi dotlaku je stabilnější u technologie konvenčního kaskádového vstřikování s rozdíly do ± 5 bar oproti technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, kde jsou rozdíly až ± 15 bar.

Při porovnání naměřených tlakových průběhů během experimentu s tlakovými průběhy uváděnými v literatuře (např. použitá literatura 3 a 4) vykazuje tlakový průběh kmit tlaku v dutině nástroje během vstřikovací fáze způsobený otevřením vtokových trysek horkého rozvodu, vycházející z principu plnění dutiny nástroje v případě výstřiku použitého v experimentu. K přepnutí na dotlak docházelo v okamžiku zaplnění dutiny nástroje přibližně z 95 %, což se projeví okamžitým poklesem tlaku v dutině nástroje při přechodu na dotlakovou fázi. V literatuře se uvažuje přepnutí na dotlakovou fázi po zaplnění celé dutiny plastem, případně až po zaplnění a stlačení taveniny v dutině, v anglicky psaných literaturách nazývaných „packing“, a proto má tlak v dutině nástroje během přepnutí na dotlak hladký průběh.

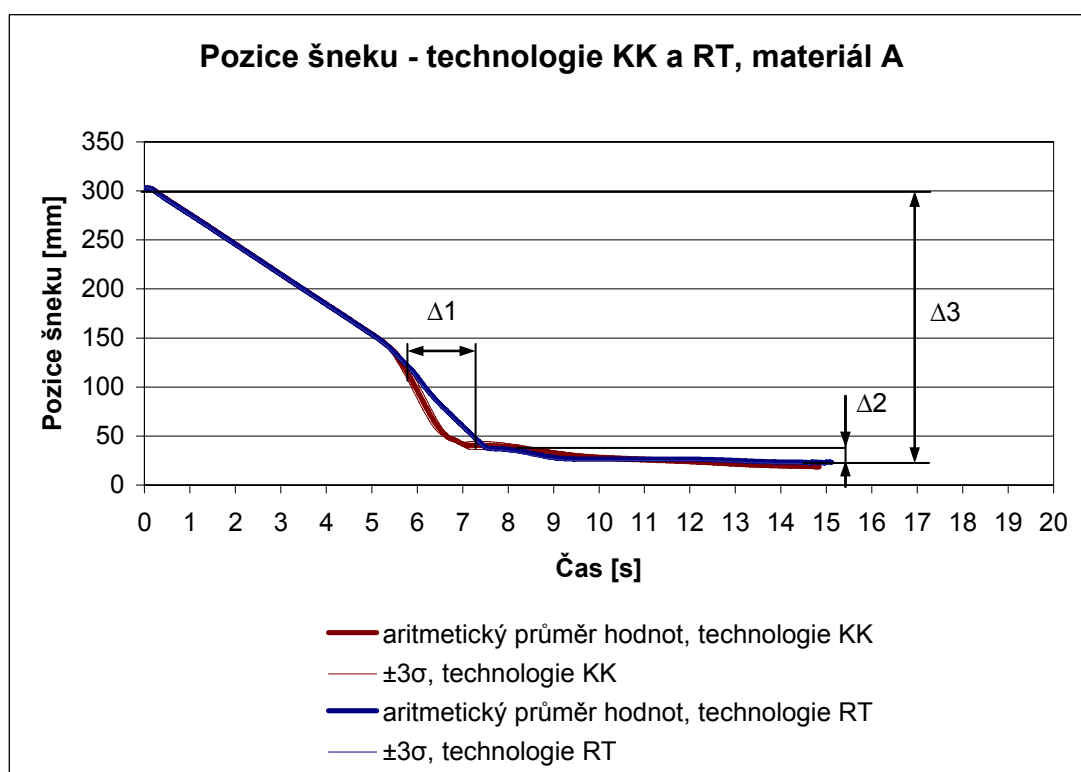
3.6.4 Porovnání průběhů pozic šneku během vstřikovacího procesu

Jak již bylo zmíněno, průběh polohy šneku v závislosti na čase je významnou informací. Na základě této závislosti je možné při znalosti průměru šneku vstřikovací jednotky analyzovat vstřikovací rychlost.

U obou technologií začíná pohyb šneku na pozici 300 mm. Z počátku se šnek pohybuje konstantní rychlostí 30 mm/s (viz obr. 71). Zlomovým okamžikem je začátek záměrného zrychlení pohybu šneku 0,5 s před otevřením trysek 2 a 3, vycházející z nastaveného vstřikovacího profilu tak, aby při otevření těchto trysek měl šnek již požadovanou maximální rychlost. Zrychlení pohybu šneku je razantnější u technologie konvenčního kaskádového vstřikování, kde rychlost pohybu šneku stoupá až na 90 mm/s oproti technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, kde je dosaženo nejvyšší rychlosti pohybu šneku 50 mm/s.

K přepnutí na dotlak u technologie konvečního kaskádového vstřikování dojde v čase 6,9 s, což odpovídá poloze šneku 40 mm. U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je přepnutí na dotlak řízeno podle času 7,2 s, což odpovídá poloze šneku 39 mm. V okamžiku přepnutí na dotlak se rychlost pohybu šneku zpomalí a stroj působí na taveninu ve vstřikovací jednotce nastaveným systémovým tlakem. Oblast zrychlení pohybu šneku je v obr. 71 vyznačena kótou $\Delta 1$.

Jakmile je dutina zcela zaplněna, přibližně v čase 8 s, dochází dále ke kompenzaci smrštění tuhnoucí taveniny v dutině nástroje a to se projeví na průběhu polohy šneku v podobě poměrně malého posunu šneku o 12 mm, v obr. 71 vyznačeno kótou $\Delta 2$, přičemž šnek se pohybuje rychlostí do 2 mm/s a rychlost pohybu šneku je nejpomalejší za celou fázi plnění. Celá dráha pohybu šneku při plnění dutiny nástroje je vymezena kótou $\Delta 3$.

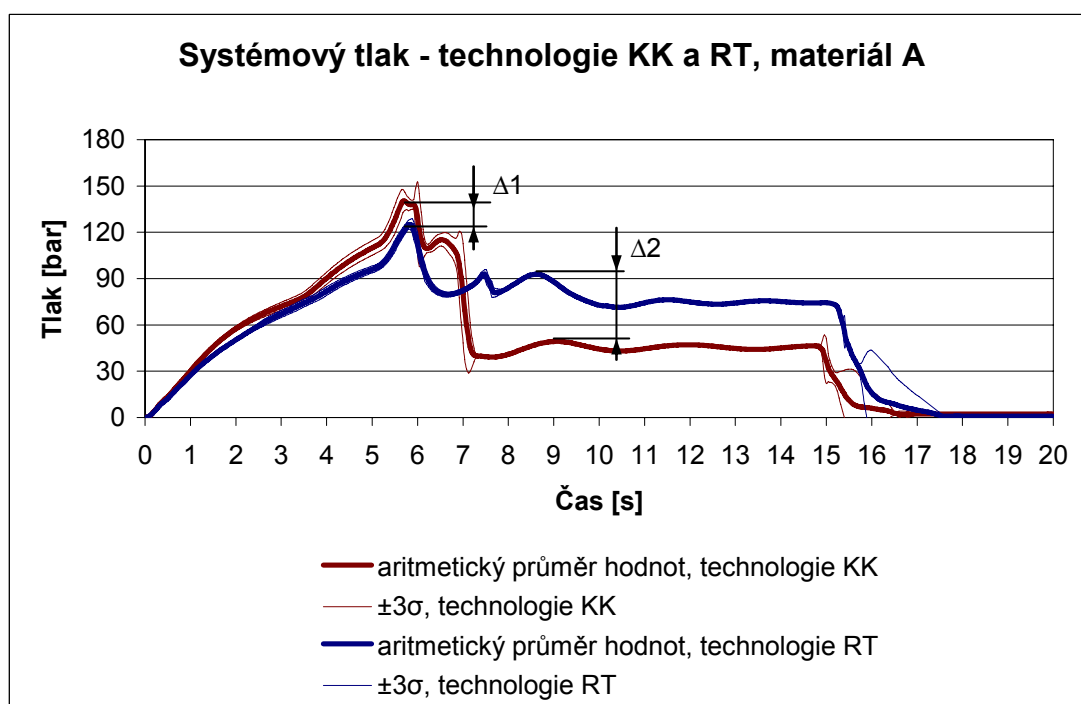


Obr. 71. Vzájemné porovnání průběhů poloh šneku naměřených při vstřikování pomocí technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a technologie řízení tlaku ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), s materiálem A

Grafy závislosti pozice šneku na čase během vstřikovacího cyklu uváděné v literatuře mají hladší průběh oproti naměřeným závislostem během experimentálních měření. Skokové změny rychlosti pohybu šneku jsou způsobeny úmyslným nastavením vstřikovacího profilu s ohledem na požadavky výrobitelnosti kvalitních výstřiků během experimentálních měření.

3.6.5 Porovnání průběhů systémových tlaků během vstřikovacího procesu

Průběhy hodnot systémových tlaků (viz obr. 72) jsou důsledkem vstřikovacích a dotlakových profilů nastavených na stroji (viz kapitoly 3.3.1 a 3.3.2). U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje nemá systémový tlak zásadní vliv na plnění dutiny nástroje, neboť je vstřikovací proces řízen ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.



Obr. 72. Vzájemné porovnání průběhů systémových tlaků naměřených při vstřikování pomocí technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), s materiálem A

Systémové tlaky mají u obou technologií téměř stejný počáteční průběh, až do momentu nastaveného rozdílného zrychlení pohybu šneku, kdy u konvenčního kaskádového vstřikování bylo nastaveno zrychlení pohybu šneku na maximální hodnotu o 55 % vyšší než u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. Po otevření následujících trysek vtokového systému 2 a 3 dochází k prudkému poklesu systémových tlaků. Dosažené maximum tlaků v době vstřiku je při použití technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje o 21 bar nižší než u konvenčního kaskádového vstřikování, viz $\Delta 1$ v obr. 72.

Při využití technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje může být průběh systémového tlaku teoreticky téměř jakýkoliv, pokud jeho velikost nezpůsobí příliš velké namáhání nebo degradaci materiálu. Jedinou podmínkou je, aby stroj dodával na trysky horkého rozvodu, resp. do řídicího systému v tryskách nástroje, taveninu o tlaku vyšším, než je hodnota tlaku, kterou vymezují referenční tlakové křivky nastavené pro jednotlivé trysky horkého rozvodu.

Z obrázku průběhů systémových tlaků je zřejmé, že tavenina u vstřikování pomocí technologie řízení tlaku ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je vystavována ve fázi dotlaku většímu tlaku až o 50 %, vztaženo na maximální hodnoty systémového tlaku ve fázi dotlaku, než u technologie konvenčního kaskádového vstřikování (viz $\Delta 2$ v obr. 72).

V případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je tavenina patrně stlačována vlivem působení vyššího tlaku, než je tlak potřebný pro plnění dutiny formy. U běžného vstřikování by tedy mohla hrozit expanze taveniny během vstřikování vlivem viskoelastického chování tavenin plastů. Důsledkem způsobu řízení této technologie, kdy je proces řízen na tryskách vtokového systému závislostí tlaku taveniny na čase, je však vliv takového rozdílu systémových tlaků minimální, což potvrzují i dosažené maximální hodnoty tlaku v dutině nástroje ve fázi dotlaku. Nevýhodou technologie je však již dříve zmíněná necitlivost na změnu viskozity taveniny, která se zde zřejmě projeví v důsledku působení vyšších tlaků na taveninu.

3.6.6 Softwarová simulace tlakové bilance vstřikovacího procesu

Softwarové simulace nebyly zaměřeny pouze na analýzu tlaku v dutině nástroje v jednom místě, ale i na rozbor tlakových poměrů v celé dutině nástroje a ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. Pro simulaci byl zvolen software Moldflow Plastics Insight 6.1, který umožňuje simulovat vstřikovací proces jak pomocí konvenčního kaskádového vstřikování, tak technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

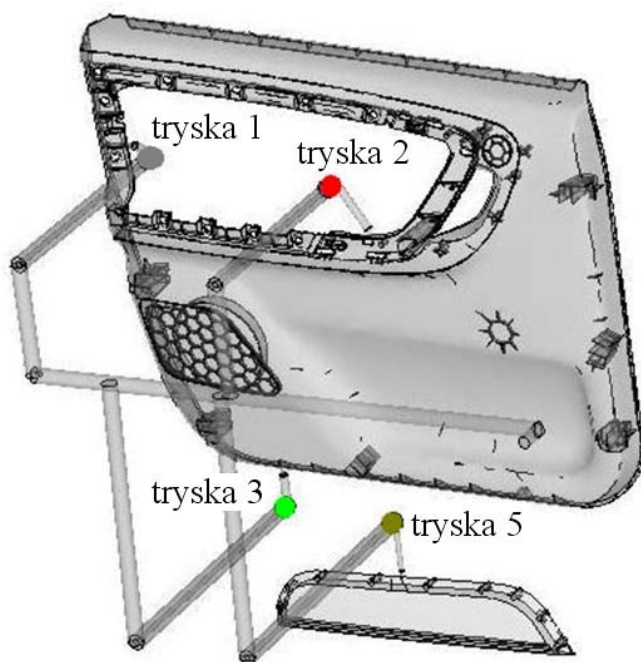
Pro výpočet byly zadávány podmínky vstřikování maximálně shodné s reálným procesem, ať už se jednalo o model vstřikovacího nástroje (viz obr. 53), technologické parametry či samotný materiál.

Na obr. 73 je model výstřiku připravený pro analyzování technologie konvenčního kaskádového vstřikování s vyznačenými body, v kterých je průběh tlaku analyzován v případě rozboru tlaků ve vtokovém systému horkého rozvodu, a na obr. 75 je obdobný model pro rozbor tlaků ve vtokovém systému u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

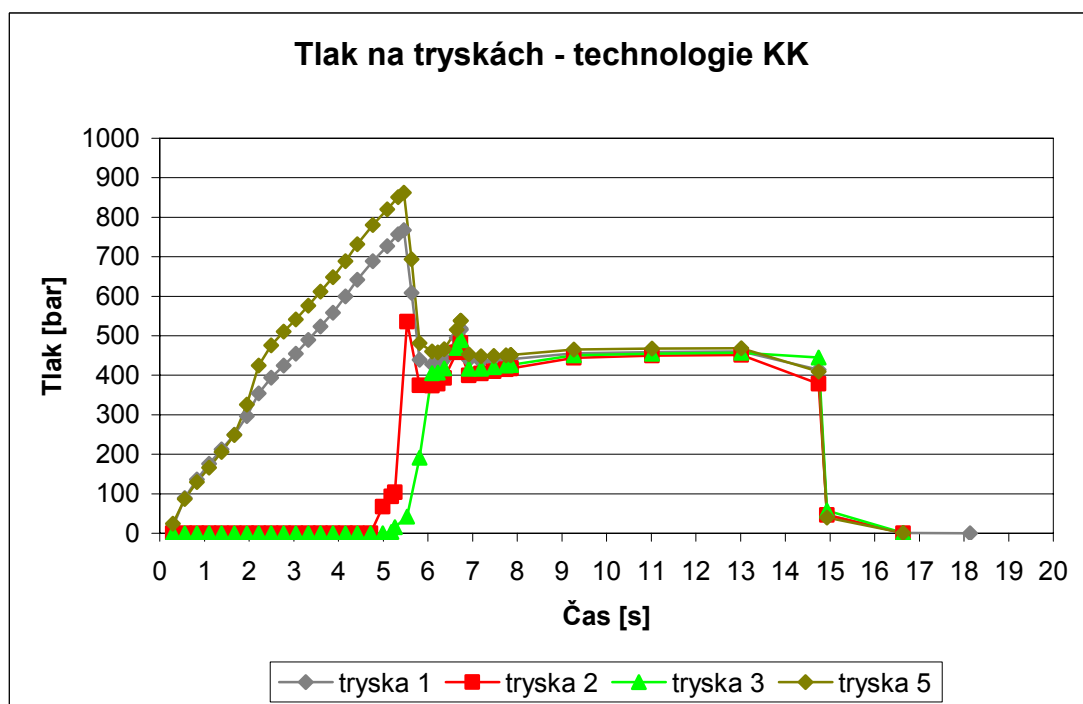
U technologie konvenčního kaskádového vstřikování odpovídají tlakové průběhy ve vtokovém systému požadovanému otevírání a zavírání trysek (viz obr. 52). U průběhu tlaku ve vtokovém systému se i přes trojnásobné záměrné zvýšení

rychlosti pohybu šneku v čase otevírání následujících trysek 2 a 3 objevuje pokles tlaku v době okolo 6 s, který je zapříčiněn změnou tlakových poměrů v horkém rozvodu (viz obr. 74).

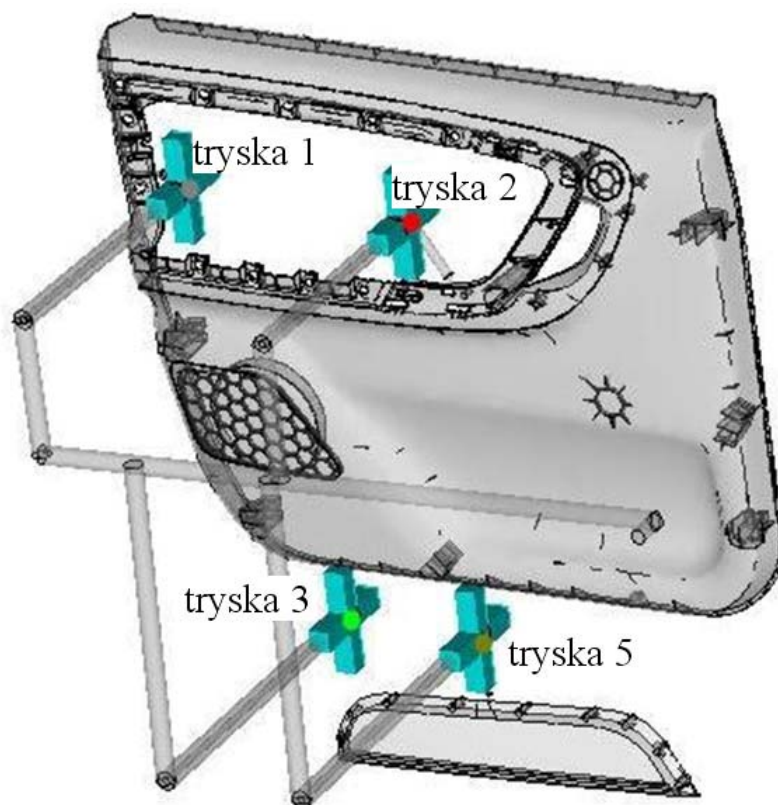
U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje odpovídá tlak v jednotlivých tryskách horkého vtokového systému zadaným tlakovým profilům (viz obr. 76).



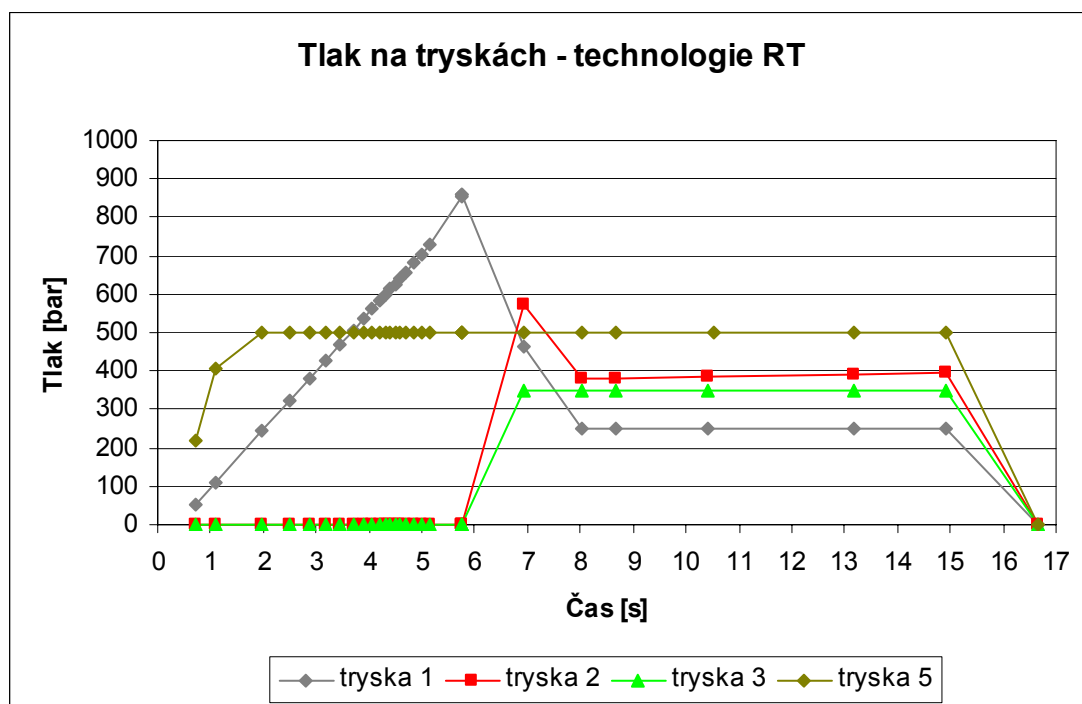
Obr. 73. Model pro simulaci technologie konvenčního kaskádového vstřikování



Obr. 74. Průběh tlaků na tryskách vtokového systému u technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK)

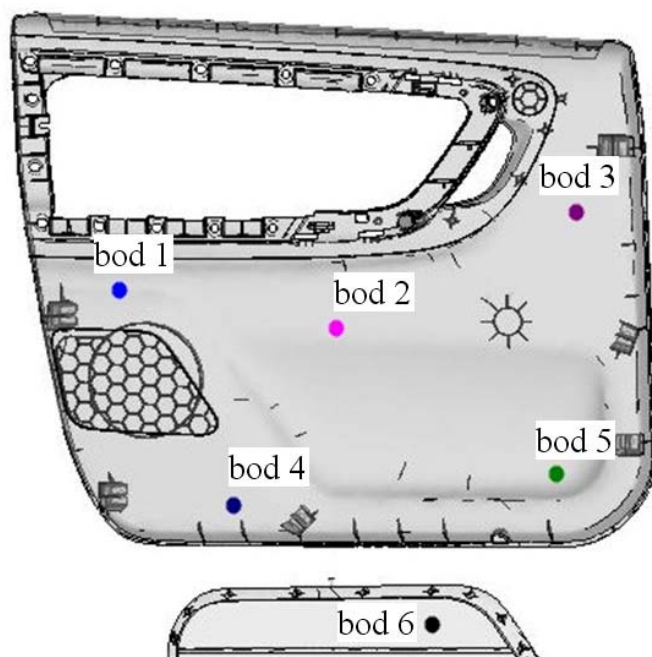


Obr. 75. Model pro simulaci technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje



Obr. 76. Průběh tlaků na tryskách vtokového systému u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

Na obrázku 77 jsou vyznačena místa měření tlaku v ploše výstřiku pro obě technologie. Body byly voleny tak, aby dávaly přehled o celkových tlakových poměrech ve výstřicích.



Obr. 77. Body analyzované z pohledu tlaku v dutině nástroje

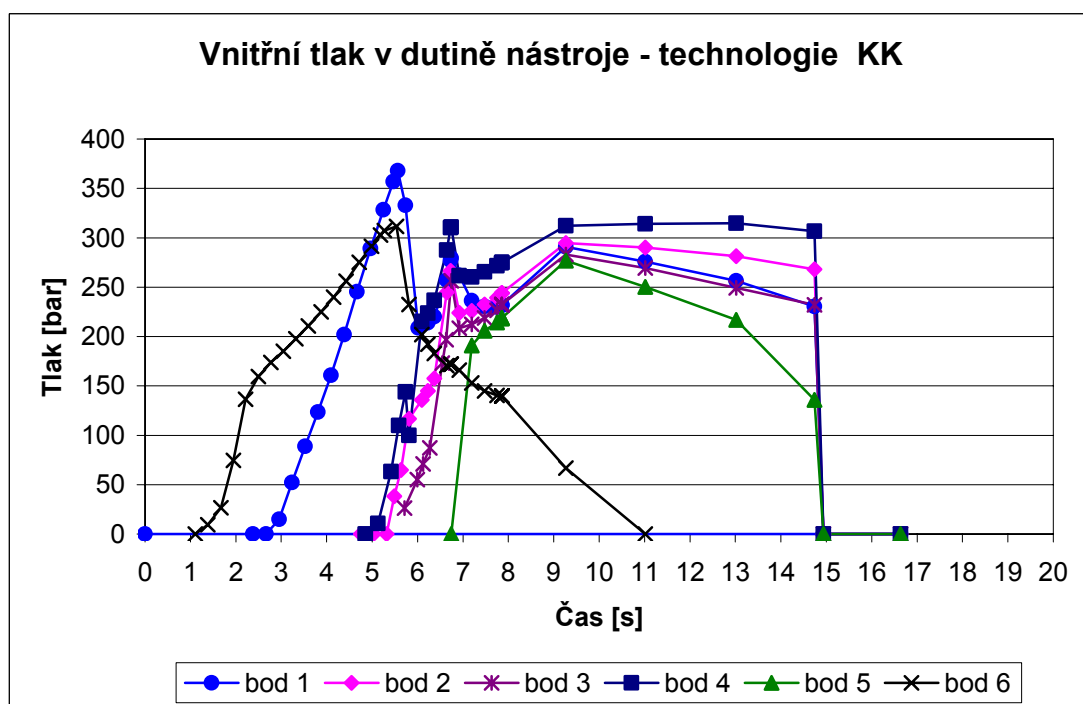
Z pohledu průběhů vnitřních tlaků uvnitř výrobku bylo zjištěno větší rozpětí jednotlivých průběhů v bodech u technologie konvenčního kaskádového vstřikování (viz obr. 78). Největšího rozdílu 172 bar je dosaženo u této technologie na konci fáze dotlaku, kde je variační koeficient zjištěných tlaků $v_x = 27,2 \%$.

Oproti tomu průběhy jednotlivých tlaků v ploše u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (viz obr. 79) dosahují celkově menších tlakových rozdílů mezi jednotlivými body s rozpětím 62 bar na konci dotlaku a variačním koeficientem 10,5 %.

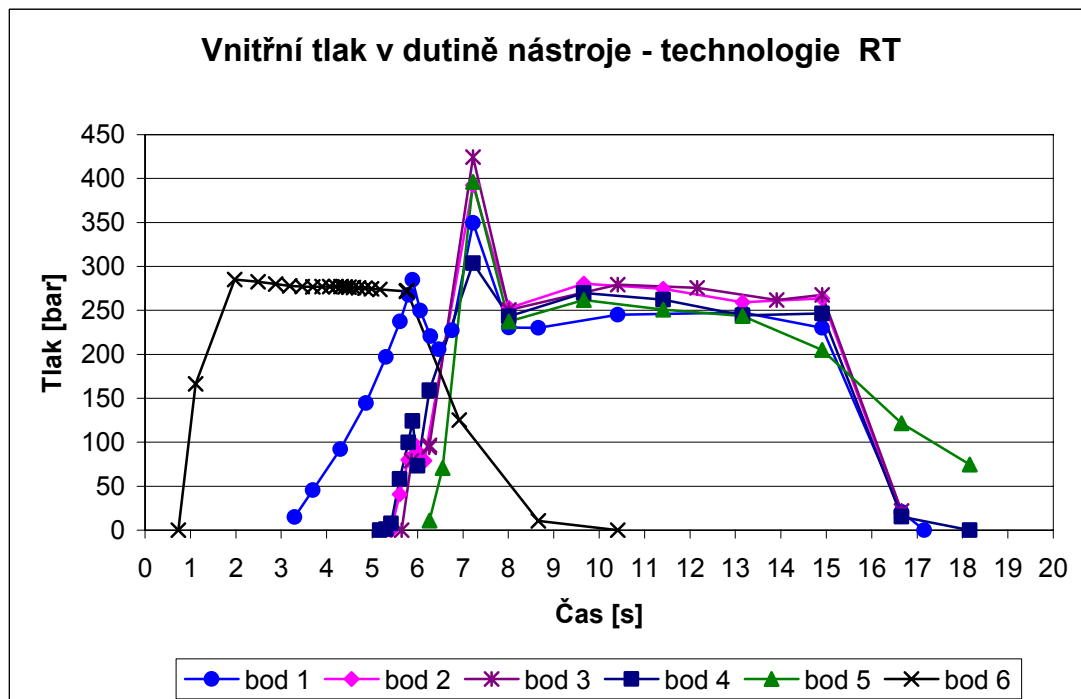
Na základě tohoto výsledku ze simulace je možné usuzovat, že výstřiky vyrobené technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje by mohly mít menší rozdílnost mechanických vlastností v ploše výrobku včetně menšího vnitřního pnutí.

Pokud je u technologie konvenčního kaskádového vstřikování zvýšen dotlak za účelem zmenšení rozdílů průběhu jednotlivých analyzovaných tlaků v dotlaku, dojde pouze k posunutí křivek k vyšším tlakům, nikoliv však k jejich vyrovnání.

V tabulce 11 jsou zaznamenány hodnoty tlaku v dutině nástroje v měřených bodech na konci fáze dotlaku pro jednotlivé technologie včetně dráhy toku taveniny.



Obr. 78. Průběh tlaků v dutině nástroje u technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK)

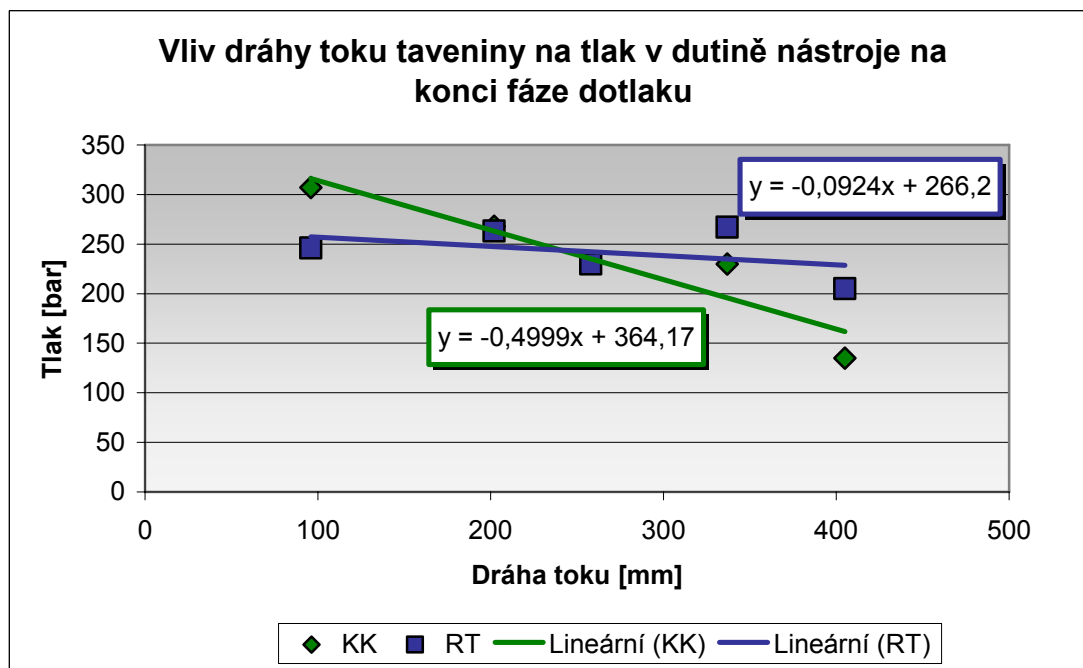


Obr. 79. Průběh tlaků v dutině nástroje u řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

Tab. 11. Tlak v dutině nástroje na konci fáze dotlaku

Bod	Dráha toku taveniny v dutině nástroje [mm]	Tlak [bar]	
		Technologie KK	Technologie RT
1	258	232	230
2	202	268	263
3	337	230	267
4	96	307	246
5	405	135	205
V_x		0,272	0,105

V obr. 80 je provedena lineární regrese závislosti tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku na dráze toku taveniny v dutině nástroje. U obou technologií tlak v ploše výstřiku klesá se zvětšující se dráhou toku taveniny v dutině nástroje. Tlak u technologie konvenčního kaskádového vstřikování klesá prudce, a to 0,5 násobně s dráhou toku taveniny. V případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je pokles tlaku pozvolnější, a to 0,09 násobně s dráhou toku taveniny v dutině nástroje.

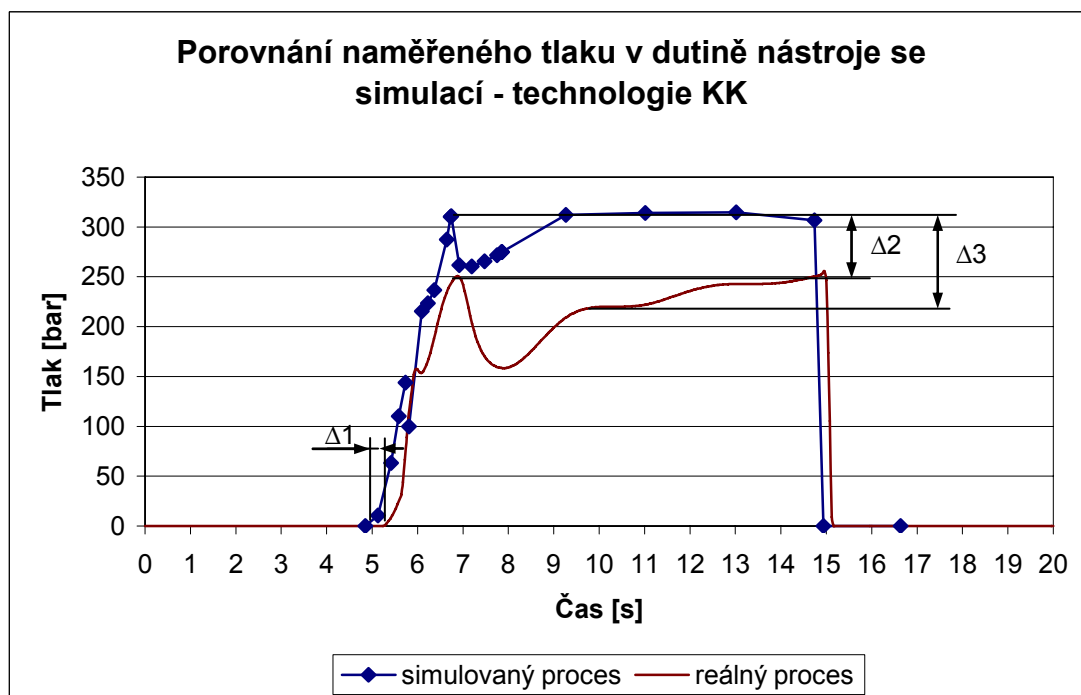


Obr. 80. Lineární regrese závislosti tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku na dráze toku taveniny v dutině nástroje v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

3.6.7 Porovnání průběhů reálných a simulovaných tlaků v dutině nástroje

Pro porovnání průběhů vnitřních tlaků v dutině nástroje naměřených v reálném procesu a získaných ze softwarové simulace je zvolen průběh tlaku ve stejném bodě, ve kterém byl tlak v dutině analyzován v kapitole 3.6.1 a 3.6.2 (viz obr. 58), což odpovídá v simulacích bodu 4 (viz obr. 77).

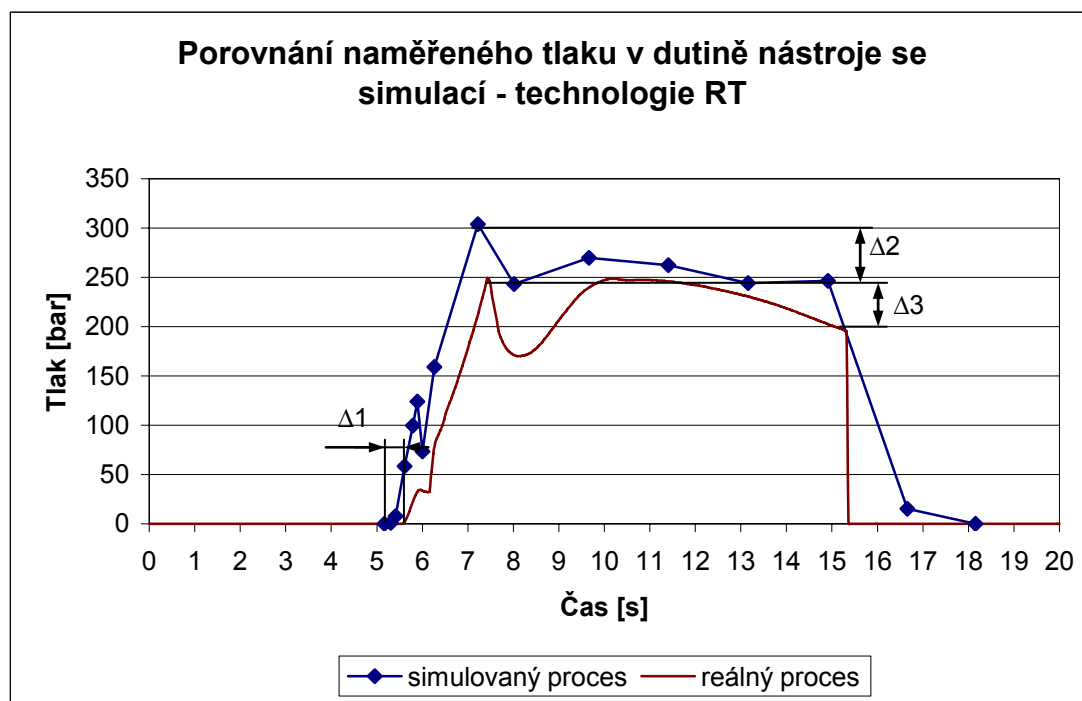
Obrázek 81 znázorňuje porovnání průběhu vnitřního tlaku v dutině nástroje u technologie konvenčního kaskádového vstřikování. Tlakový průběh získaný simulací je posunut od reálného tlakového průběhu přibližně o 0,3 s k nižším časům (viz $\Delta 1$ v obr. 81) a dosahuje celkově vyšších tlaků, než byly tlaky naměřené, a to v maximálních hodnotách tlaku ve fázi vstřiku o 52 bar (viz $\Delta 2$) a ve fázi dotlaku je rozdíl hodnot až 94 bar (viz $\Delta 3$). U této technologie odpovídá simulace reálnému procesu z pohledu průběhu vnitřního tlaku v dutině nástroje v daném místě více jak ze 70 % v oblasti největších tlakových rozdílů ve fázi dotlaku $\Delta 3$. Tlaky ve fázi vstřiku a časové poměry tlakových průměrů odpovídají s přesností až 95 %.



Obr. 81. Porovnání naměřeného tlaku v dutině nástroje u reálného procesu a procesu simulovaného v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK)

Porovnání průběhu tlaku v dutině nástroje naměřeného a simulovaného u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je zachyceno na obr. 82. Přesnost výsledků simulace je ještě větší než u simulace konvenčního kaskádového vstřikování. Nárůst tlaku v případě simulovaného procesu v daném místě dutiny nástroje začíná o 0,2 s dříve než u reálného procesu (viz $\Delta 1$ obr. 82). Největšího tlakového rozdílu je dosaženo v maximálních hodnotách vstřikovací fáze, kde je rozdíl menší než 58 bar (viz $\Delta 2$). U dotlakové fáze bylo dosaženo maximálního rozdílu 46 bar (viz $\Delta 3$). Je možné konstatovat, že tlakový profil získaný simulací odpovídá realitě u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje minimálně z 80 %.

Rozdíly v průbězích tlaků mohou být způsobeny faktem, že skutečný vstřikovací nástroj není ideální a tavenina podléhá větším odporům během plnění dutiny. V reálném procesu je navíc tlak měřen na stěně dutiny nástroje na rozdíl od procesu simulovaného, kde je prezentovaným tlakem průměrný tlak napříč stěnou výrobku.



Obr. 82. Porovnání naměřeného tlaku v dutině nástroje u reálného procesu a procesu simulovaného v případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

Na základě těchto porovnání průběhů tlaků v dutině je možné konstatovat, že simulovaný proces vstřikování v porovnání s reálným procesem je z pohledu tlakových průběhů v dutině nástroje přesný minimálně ze 70 %.

3.7 Analýza homogenity mechanických vlastností výstřiků

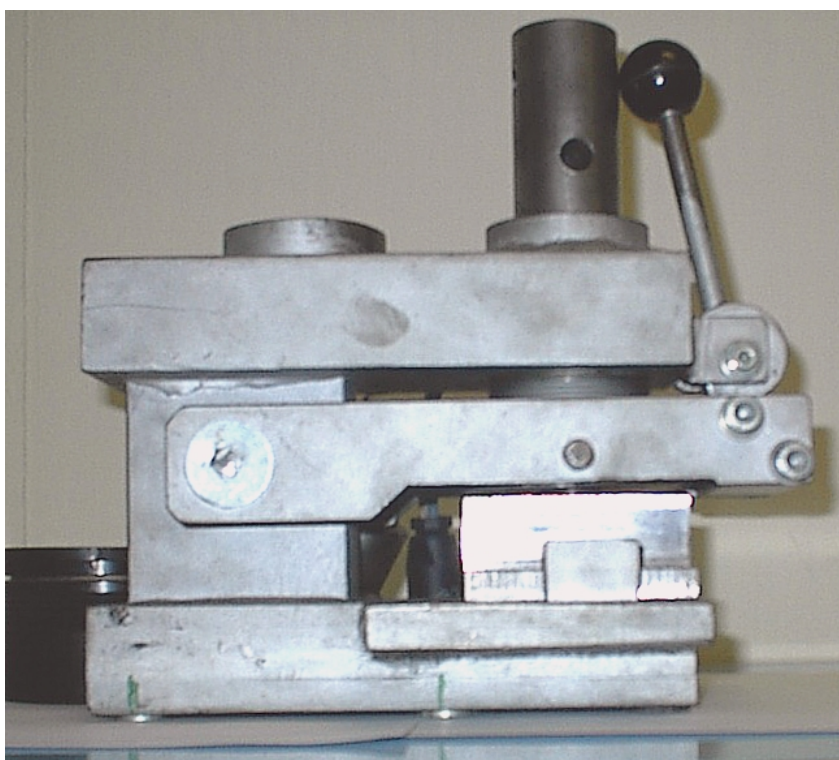
Vzhledem k poznatkům získaným z analýz vstřikovacího procesu je možné předpokládat nejen, že vlastnosti výstřiků vyrobených rozdílnými technologiemi mohou vykazovat rozdílné mechanické vlastnosti, ale že se mohou vyskytovat i rozdílné mechanické vlastnosti v dílech samotných. Na základě této úvahy byly provedeny analýzy homogenity mechanických vlastností v ploše výstřiku.

Pro hodnocení homogenity mechanických vlastností výstřiků bylo využito stanovení pevnosti materiálu ve sřihu v různých místech výrobku. Tato metoda má řadu předností, mezi které patří především dobrá reprodukovatelnost naměřených hodnot, přičemž přesnost stanovení pevnosti ve sřihu je vyšší než stanovení pevnosti v tahu [35].

Podobně jako u jiných zkoušek mechanických vlastností je ovšem nutné, aby tloušťka zkušebního tělesa byla konstantní. Také zde má pevnost ve střihu přednost v tom, že měřená plocha je malá, takže tento požadavek je zpravidla snadno splnitelný.

Pevnost ve střihu vyjadřuje průměrnou hodnotu ve zkoušeném místě bez ohledu na izotropii vlastností tělesa. Je-li pevnost ve střihu porovnána s průměrnou hodnotou pevnosti v tahu v témže místě tělesa, je tento poměr pro různá místa měření na výstřiku téměř konstantní. Díky této skutečnosti je možné získat na základě hodnot pevnosti ve střihu představu o pevnosti v tahu. Obdobně lze získat i představu o tvrdosti výstřiku [12, 35].

Zkušební tělesa byla odebrána z míst, kde se tloušťka stěny výstřiku měnila minimálně a kde vůbec bylo možné zkušební těleso vyříznout bez ovlivnění dalšího měření. To tedy znamená, že na ploše zkušebních těles nebylo ani místo po vtoku, ale ani žebro a přechody v tloušťce stěny.



Obr. 83. Střížný nástroj

Měření bylo prováděno na pěti výrobcích vyrobených technologií konvenčního kaskádového vstřikování a u pěti výstřiků vyrobených technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje s materiálem A, tedy s materiálem s 3 % příměsí barviva Onyx. Výrobky byly kondicionovány po dobu

24 hodin při 23 °C a vlhkosti 50 %, poté byly z dílů odebrány a proměřeny zkušební vzorky.

Pro stanovení pevnosti ve stříhu byl použit střížný nástroj jednoduché konstrukce (viz obr. 83), ve kterém je přidržení stříhaného materiálu zajištěno pákovým mechanismem. Pro experiment bylo využito střížníku o průměru 22,15 mm, což zajišťuje střížnou mezeru 0,025 mm.

Pro vyvinutí střížné síly při zachování konstantní střížné rychlosti byl nástroj upnut do zkušebního zařízení TIRATEST 2300 s řídicím a vyhodnocovacím softwarem Labtest 2 (viz obr. 84).

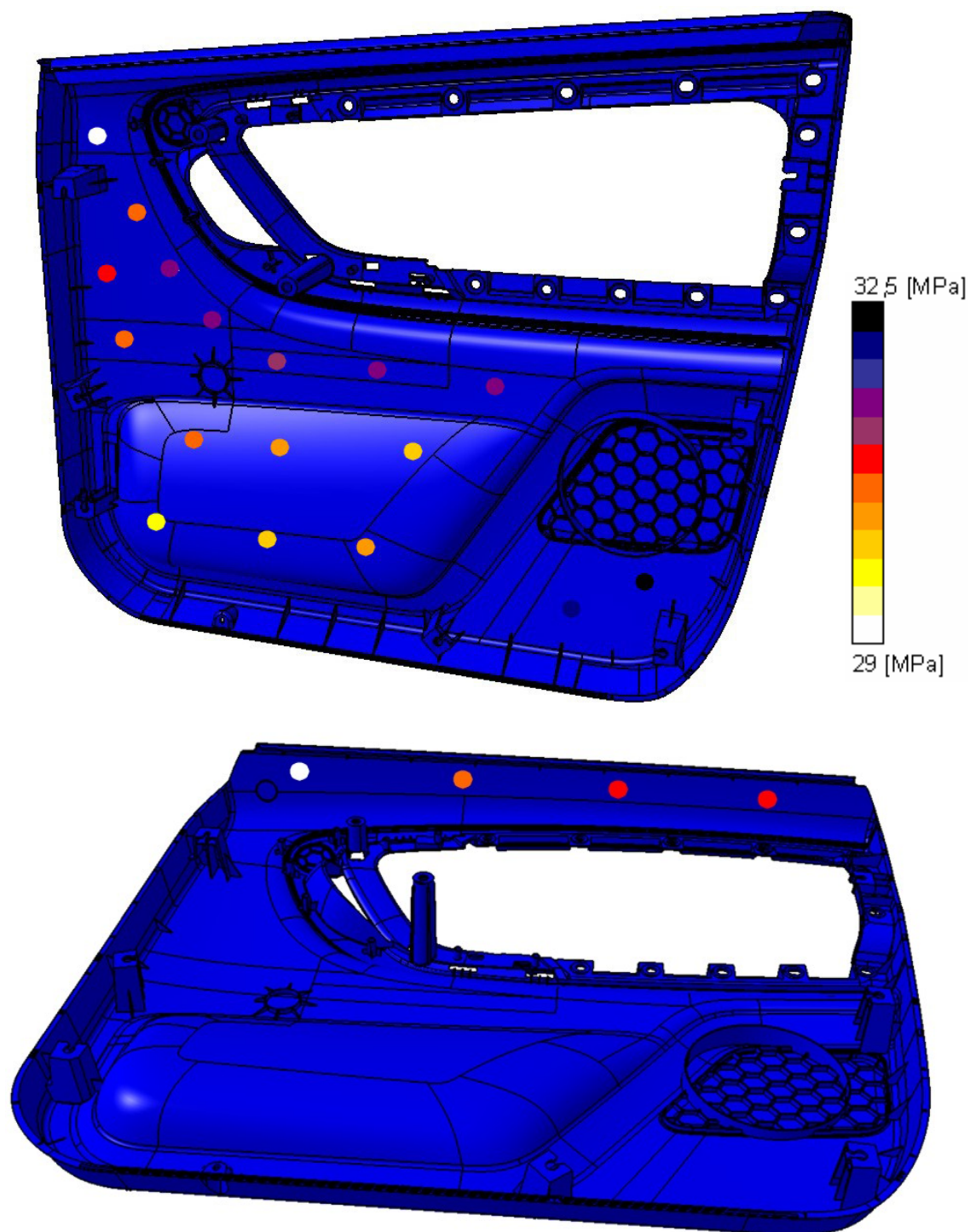


Obr. 84. Zkušební zařízení TIRATEST 2300

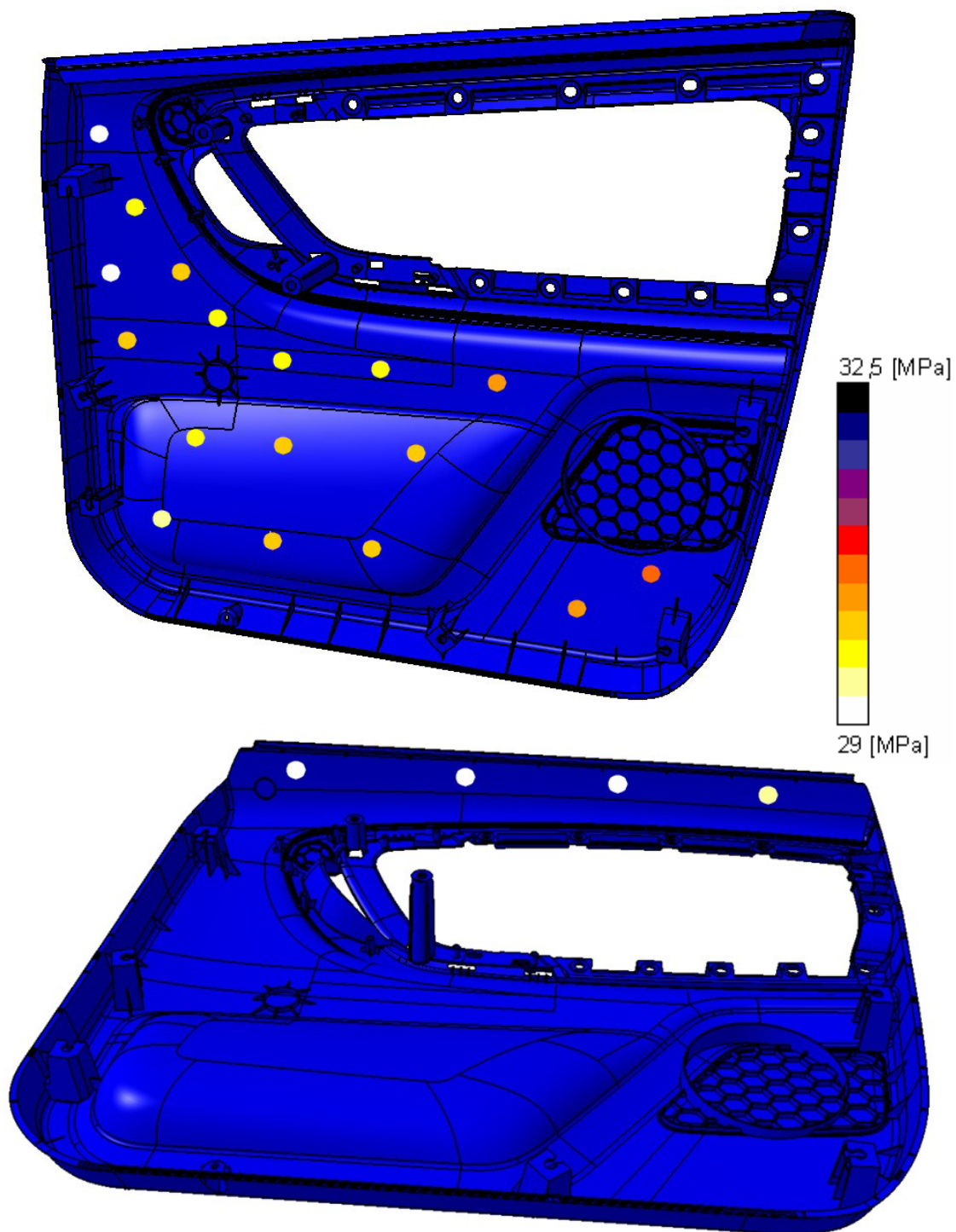
Rychlost pro pohyb střížníku při děrování byla pro všechny vzorky konstantní $v_{st} = 50 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$.

Na každém výstřiku bylo měřeno 21 různých míst. Pozice měřených míst a naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 1. Pro lepší názornost jsou hodnoty zpracovány pomocí barevné škály znázorňující hodnoty v rozmezí od 29 do 32,5 MPa.

Obrázek 85 představuje výsledek měření pevnosti ve stříhu dílů vyrobených technologií konvenčního kaskádového vstřikování a obr. 86 dílů vyrobených technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.



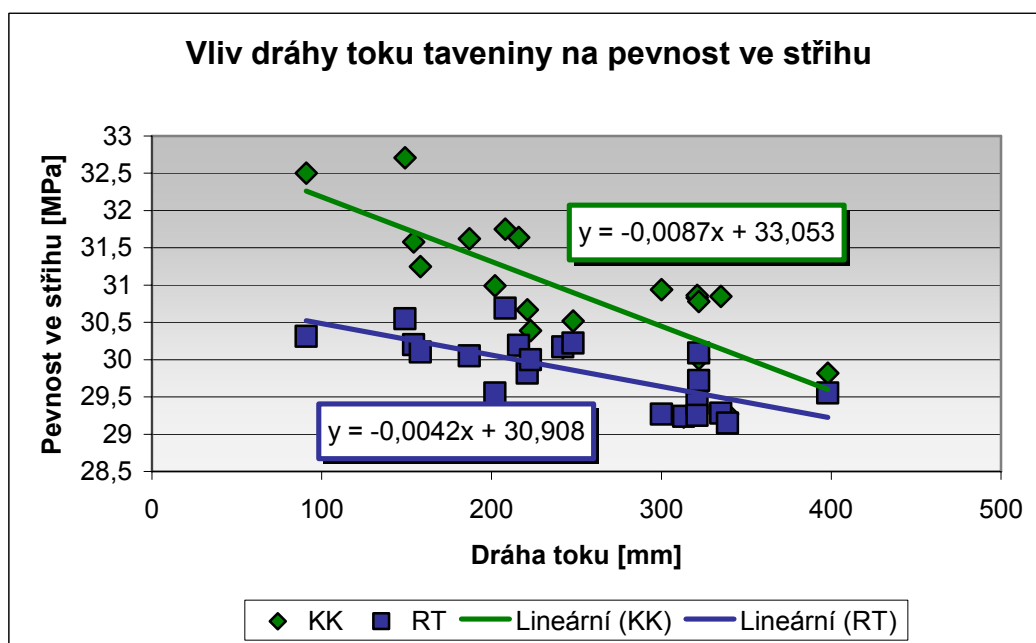
Obr. 85. Pevnost ve střihu u dílů vyrobených technologií konvenčního kaskádového vstříkování



Obr. 86. Pevnost ve střihu u dílů vyrobených technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

Z analýzy pevnosti ve stříhu je patrné, že díly vyrobené pomocí technologie konvenčního kaskádového vstřikování vykazují celkově vyšší hodnoty pevnosti ve stříhu a variační koeficient průměrných hodnot pevnosti ve stříhu je 29,6 %, což značí větší variabilitu hodnot oproti pevnosti ve stříhu naměřené u dílů vyrobených technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, kde je variační koeficient 15,5 %. Nejvyšší hodnoty pevnosti ve stříhu byly naměřeny v okolí vtokových ústí, kde je u technologie konvenčního kaskádového vstřikování dosaženo hodnoty až 32,71 MPa. U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je maximální naměřená hodnota pevnosti ve stříhu 30,69 MPa.

Hodnoty pevnosti ve stříhu přitom klesají se zvětšující se dráhou toku taveniny v dutině nástroje u obou technologií. Po provedení lineární regrese naměřených hodnot pevnosti ve stříhu v závislosti na dráze toku taveniny v dutině nástroje je u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje směrnice přímky -0,0042 a u technologie konvenčního kaskádového vstřikování klesají hodnoty strměji se směrnicí -0,0087 (viz obr. 87).



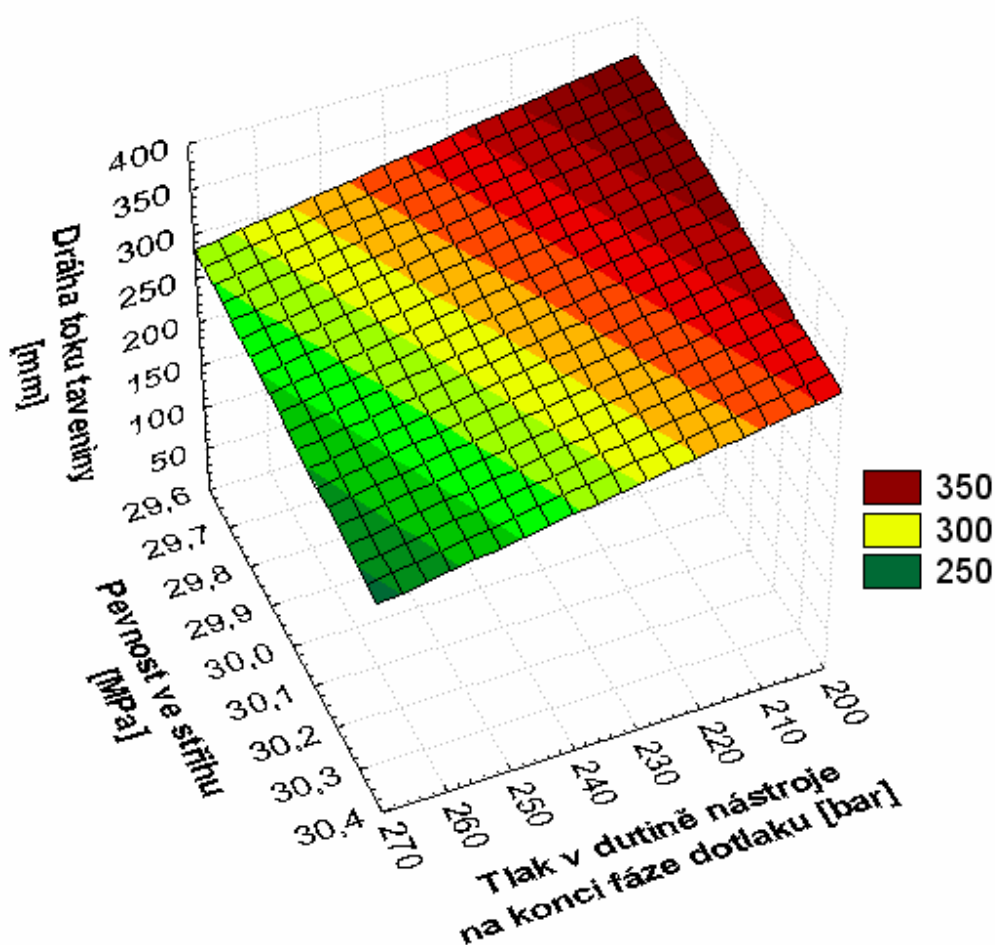
Obr. 87. Lineární regrese závislosti pevnosti ve stříhu na dráze toku taveniny v dutině nástroje v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

3.7.1 Vliv dráhy toku taveniny v dutině nástroje na pevnost ve střihu a tlak v dutině nástroje

Pro celkové porovnání homogenity vlastností výstřiku v ploše byly sestaveny grafy závislosti dráhy toku taveniny v dutině nástroje na tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku a na pevnosti ve střihu.

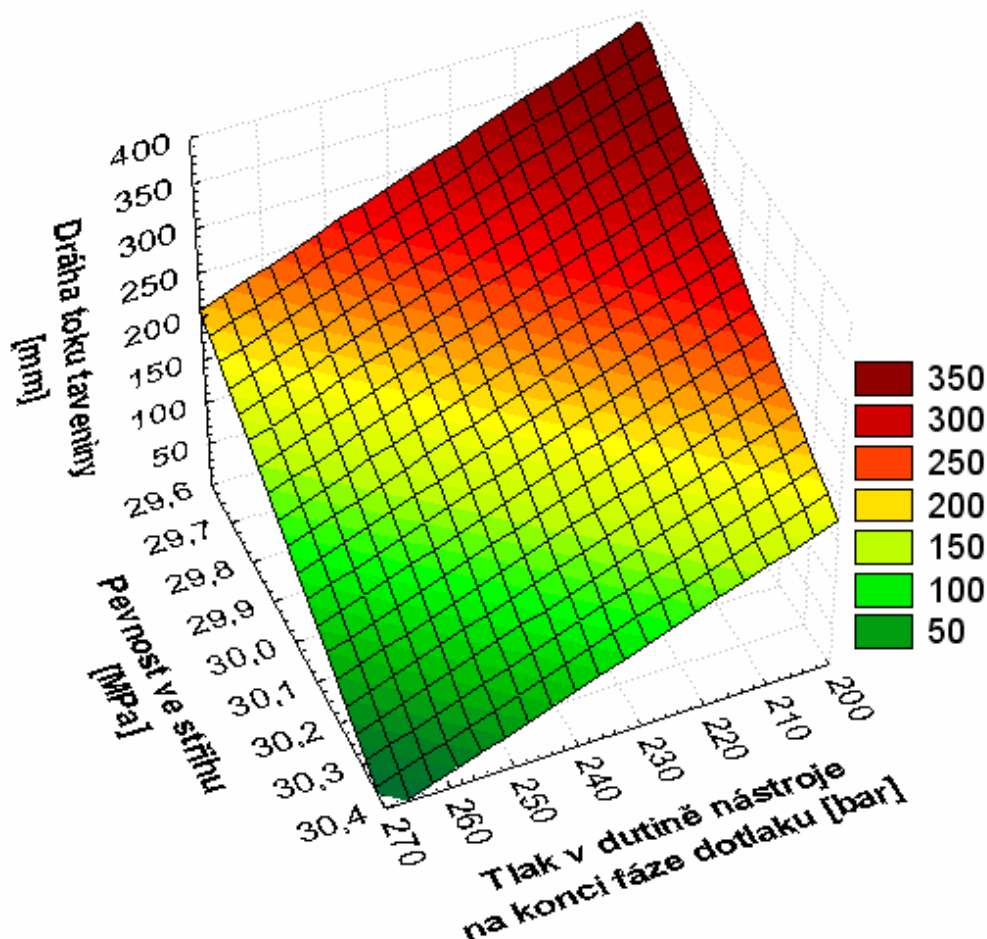
K sestavení grafů byla použita funkce lineárního plošného grafu softwaru Statistica 7.0. Grafy jsou vyneseny v rozsazích pokrývajících naměřené hodnoty s ohledem na vzájemné porovnání obou technologií. Graf pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování je na obrázku 88, pro technologii řízení tlaku ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje na obrázku 89.

**Závislost dráhy toku taveniny na
tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku
a pevnosti ve střihu - technologie KK**



Obr. 88. Závislost dráhy toku taveniny na tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku a pevnosti ve střihu pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování (KK)

Závislost dráhy toku taveniny na tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku a pevnosti ve stříhu - technologie RT



Obr. 89. Závislost dráhy toku taveniny na tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku a pevnosti ve stříhu pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

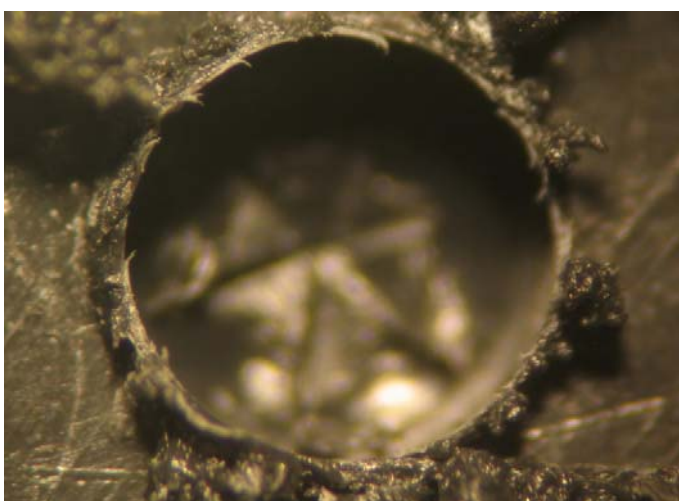
Z grafů je zřejmé, že tlak v dutině nástroje na konci fáze dotlaku i pevnost ve stříhu klesají s rostoucí dráhou toku taveniny u obou technologií. V případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování se změny hodnot tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku a pevnosti ve stříhu projeví v použitých rozsazích na dráze toku taveniny 250 - 350 mm, zatímco u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje na dráze 0 - 350 mm. To tedy znamená, že v případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je plnění dutiny rovnoměrnější z pohledu tlaku v dutině na konci fáze dotlaku a homogennější jsou i mechanické vlastnosti v ploše výstřiku.

3.8 Rozbor vnitřního pnutí výstřiků

Na základě provedených analýz tlakových poměrů při procesu plnění dutiny nástroje a pevnosti ve střihu je možná úvaha, že plnění dutiny vstřikovacího nástroje taveninou je rovnoměrnější u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje a že vnitřní pnutí v dílech vystříknutých touto technologií bude menší, než u dílů vystříknutých technologií konvenčního kaskádového vstřikování. Pro ověření této úvahy byly díly podrobeny různým zkouškám s cílem analyzování vnitřního pnutí v dílech.

První metodou bylo využití **polarizovaného světla**. Pomocí dvojlomu polarizovaného světla je možné zjistit orientační pnutí u transparentních materiálů. U analyzovaných výrobků však nebylo měření úspěšné z důvodu rozptylu světla na dezénu dílu.

Pro analyzování vnitřního pnutí je často využíváno odvrtávací metody.



Obr. 90. Měření vnitřního pnutí odvrtávací metodou

Odvrtávací metoda je založena na uvolnění zbytkových napětí vytvořením malého otvoru odvrtávacím nástrojem. Uvolňování napětí je doprovázeno deformacemi v okolí otvoru, které jsou měřeny tenzometrickými růžicemi. Na základě rozboru deformací je stanoveno původní zbytkové napětí.

Tato metoda se však bohužel nedala rovněž využít, neboť docházelo při aplikaci odvrtávací metody k natavování plastu, viz obr. 90.

V praxi je využívána pro získání představ o vnitřním pnutí **metoda teplotních deformací**, kdy je výstřik zahříván v temperační komoře, a na základě deformací dílu, tzn. relaxace napětí, je možné získat představu o vnitřním pnutí v díle. Touto metodou však u takto složitého výstřiku, který byl analyzován, nebyly dosaženy prokazatelné výsledky, ze kterých by bylo možné porovnat vnitřní pnutí v dílech vyrobených oběma technologiemi.

Jistou představu o pnutí ve výrobku může naznačovat i **celková deformace výrobku po výrobním smrštění**. Tato metoda se z dosud použitých metod ukázala jako jediná, která má vypovídající schopnost. Rozdíly deformací dílů byly měřeny na měřicím zařízení „cubing“ a porovnávacím parametrem byla spára mezi měřicím zařízením a výstřikem u „B“ sloupku, viz obr. 91.



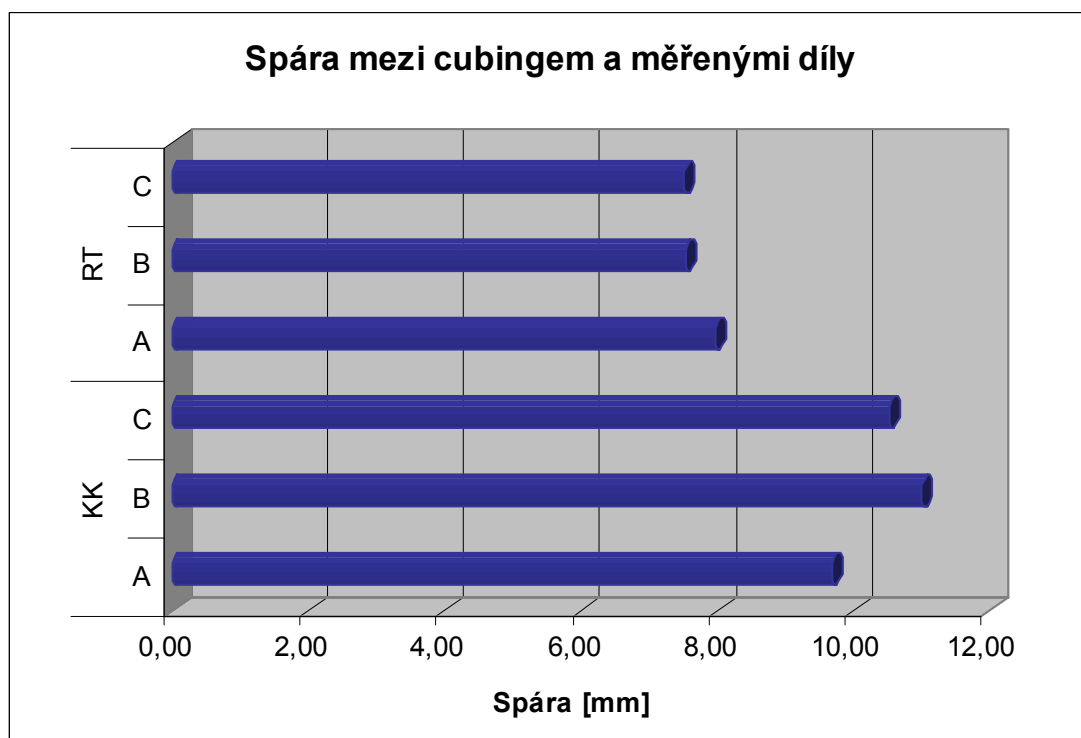
Obr. 91. Měřicí zařízení cubing s dílem a vyznačeným místem měření spáry

Od každé série, které byly vstřikovány za účelem analyzování vstřikovacího procesu u obou technologií, bylo měřeno sedm dílů. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 12 a průměrné hodnoty každého souboru jsou vyneseny v obr. 92.

Z naměřených hodnot je zřejmé, že spára mezi výstřikem a cubingem u B sloupku je v případě výstřiků vyrobených technologií konvenčního kaskádového vstřikování u všech sérií větší než spára u výrobků vstřikovaných technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, přičemž nejmenších rozdílů hodnot je dosaženo u série s materiálem A s poměrem naměřených hodnot 17,5 %. Za předpokladu, že výrobky byly vstřikovány oběma technologiemi za

maximálně možných stejných podmínek i s ohledem na princip plnění dutiny nástroje, je možné předpokládat, že měřená deformace dílů po výrobním smrštění je odrazem vnitřních pnutí ve výstřiku. V tom případě by vnitřní pnutí v dílech vyrobených technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje bylo menší.

Analyzování vnitřního pnutí ve výstřiku je i v dnešní době těžko měřitelnou záležitostí, která by si zasloužila do budoucna více pozornosti. Předložená úvaha o porovnání vnitřního pnutí mezi díly na základě deformací dílů po výrobním smrštění byla v tomto případě jedinou použitelnou metodou, jejíž výsledky byly porovnatelné a vykazovaly rozdílnost naměřených hodnot výrobků vyrobených pomocí obou analyzovaných technologií.



Obr. 92. Spára mezi cubingem a měřenými díly po výrobním smrštění u výstřiků vyrobených technologií konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), s materiály A, B a C

Tab. 12. Spára mezi dveřní výplní a cubingem u výstřiků vyrobených technologií konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a technologií řízení tlaku ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), s materiály A, B a C

Číslo měření	Spára, technologie KK [mm]			Spára, technologie RT [mm]		
	A	B	C	A	B	C
1	10,06	9,29	10,25	7,85	7,89	8,09
2	10,83	11,79	9,89	8,33	6,9	8,06
3	9,77	15,77	11,11	8,72	7,63	7,62
4	8,98	9,99	10,36	9,51	7,5	7,15
5	10,05	8,90	11,18	7,30	8,27	7,33
6	8,65	9,84	10,02	7,28	7,24	6,81
7	9,43	11,49	10,81	6,85	7,27	7,55
\bar{x}	9,68	11,01	10,52	7,98	7,53	7,52
σ	0,73	2,36	0,52	0,94	0,45	0,47

3.9 Rozbor hodnocení způsobilosti vstřikovacího procesu a analýza rozptylu naměřených hodnot

Jak pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování, tak pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje byla analyzována způsobilost procesu.

K hodnocení způsobilosti procesu bylo přistupováno ze dvou pohledů. Prvním je hodnocení způsobilosti procesu na základě krátkodobých zkoušek, kdy bylo použito výstřiků vyrobených během výše popsaných analýz vstřikovacího procesu (viz kap. 3.6.1 a 3.6.2), při kterých byly pro obě technologie vstřikovány série po 35 za sebou jdoucích zdvizích se třemi různými materiály.

Druhým pohledem pak bylo hodnocení způsobilosti při výrobním procesu v praxi, kdy každá technologie byla nasazena po dobu tří měsíců v sériové výrobě a byly tak vytvořeny podmínky pro získání doporučeného množství alespoň 25 podskupin s rozsahem podskupiny 5 po sobě vyrobených výstřiků.

Pro kompletnost analýzy způsobilosti procesu předcházelo hodnocením způsobilosti procesu stanovení způsobilosti vstřikovacího stroje.

Základní podmínkou pro stanovení indexů způsobilosti je, že hodnocený proces musí být ve statisticky zvládnutém stavu. Druhou podmínkou, která musí být splněna v případě měřitelných znaků jakosti při použití standardních vztahů pro výpočet indexů způsobilosti (vztahy 15, 16, 17, 18) je, že rozdělení sledovaného znaku jakosti musí odpovídat normálnímu rozdělení. Pro ověření splnění těchto

podmínek byl pro všechny soubory naměřených hodnot před samotným hodnocením způsobilosti procesu ověřen předpoklad normálního rozdělení pomocí testu dobré shody χ^2 na 5 % hladině významnosti. K ověření statisticky zvládnutého procesu byly použity regulační diagramy.

3.9.1 Způsobilost vstřikovacího stroje

Způsobilost vstřikovacího stroje byla stanovena indexy C_m a C_{mk} . Vztahy pro C_m a C_{mk} jsou obdobné vztahům pro C_p a C_{pk} , liší se však sběr potřebných dat. Pro stanovení C_m a C_{mk} je potřeba minimálně 50 za sebou jdoucích hodnot sledovaného parametru [9]. Měřeným parametrem byla poloha šneku na konci procesu plnění dutiny, tedy na konci dotlaku. Hodnoty naměřené při stanovování způsobilosti vstřikovacího stroje jsou zaznamenány v příloze 2 včetně testu dobré shody, histogramu a regulačních diagramů.

Stroj se obvykle považuje za způsobilý v případě, že hodnota C_{mk} je větší než 1,67 [9]. Vypočtené ukazatele způsobilosti mají hodnoty $C_m = 3,37$, $C_{mk} = 3,37$ (viz tabulka 13) a vstřikovací stroj je tedy možné označit za způsobilé výrobní zařízení.

Tab. 13. Způsobilost vstřikovacího stroje

maximální hodnota = 25,60	USL = 26,20	
$\bar{x} = 25,50$	LSL = 24,80	
minimální hodnota = 25,30	$C_m = 3,37$	C_m je vyhovující.
jmenovitá hodnota = 25,50	$C_{mL} = 3,37$	$C_{mU} = 3,37$
počet záznamů = 50	$C_{mk} = 3,37$	C_{mk} je vyhovující.
Způsobilost stroje vyhovuje.		

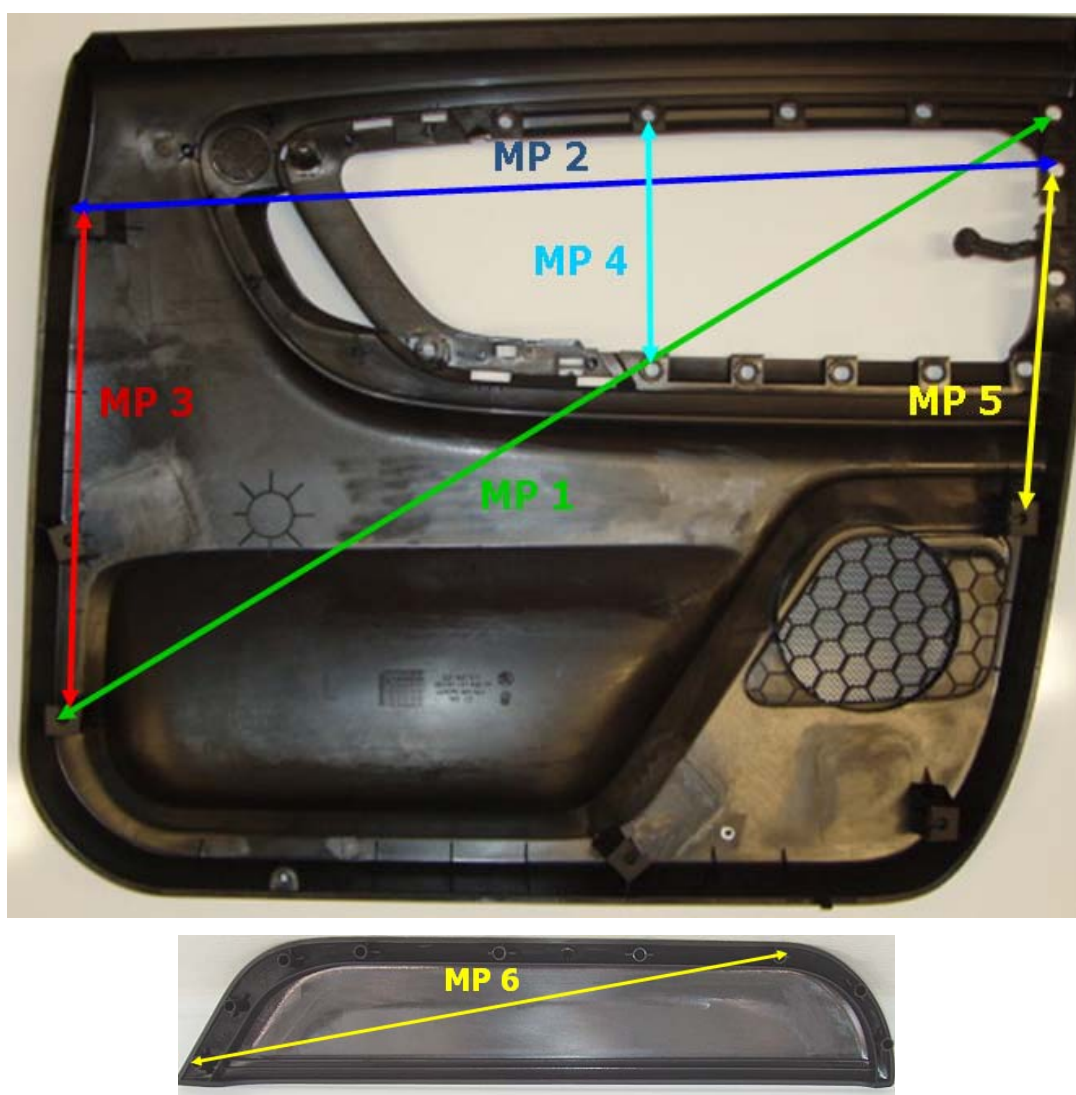
3.9.2 Analýza způsobilosti vstřikovacího procesu při krátkodobých zkouškách

Výstřiky pro určení způsobilosti procesu na základě krátkodobých zkoušek byly vyrobeny při analýzách vstřikovacího procesu (viz kap. 3.6.1 a 3.6.2). Indexy způsobilosti procesu byly tedy stanovovány v tomto případě na základě 35 měření pro každý posuzovaný parametr dané série.

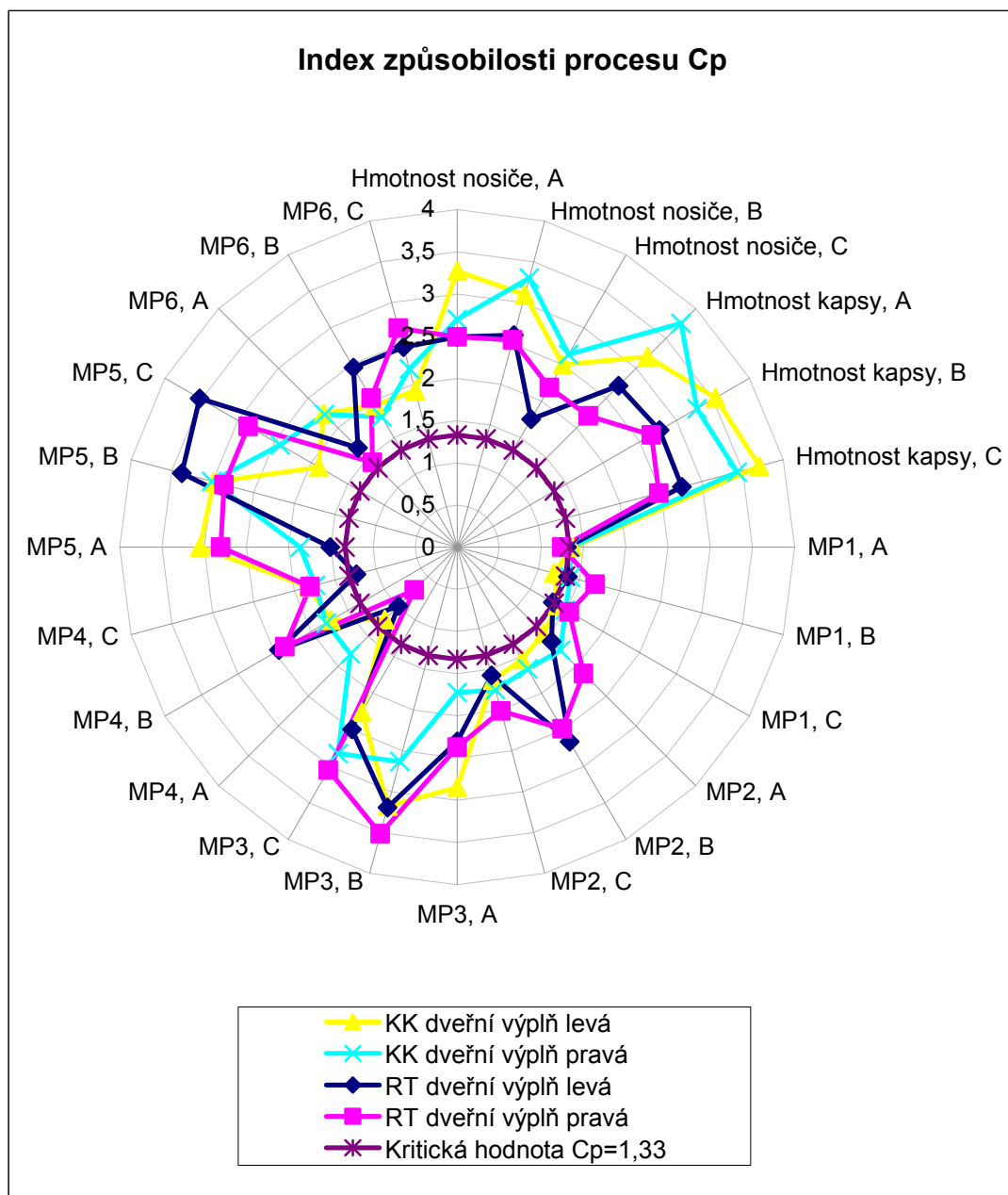
Analyzovanými parametry při hodnocení způsobilosti procesu krátkodobých zkoušek byly rozměrové parametry MP1 – MP6 (viz obr. 93) a hmotnosti výstřiků.

Indexy způsobilosti procesu pro jednotlivé měřené parametry jsou pro přehlednost vyneseny v paprskových grafech. Obrázek 94 představuje porovnání indexů způsobilosti procesu C_p a obrázek 95 hodnoty pro index způsobilosti procesu C_{pk} . Hodnoty vypočtených indexů způsobilosti procesu jsou zaznamenány v příloze 3.

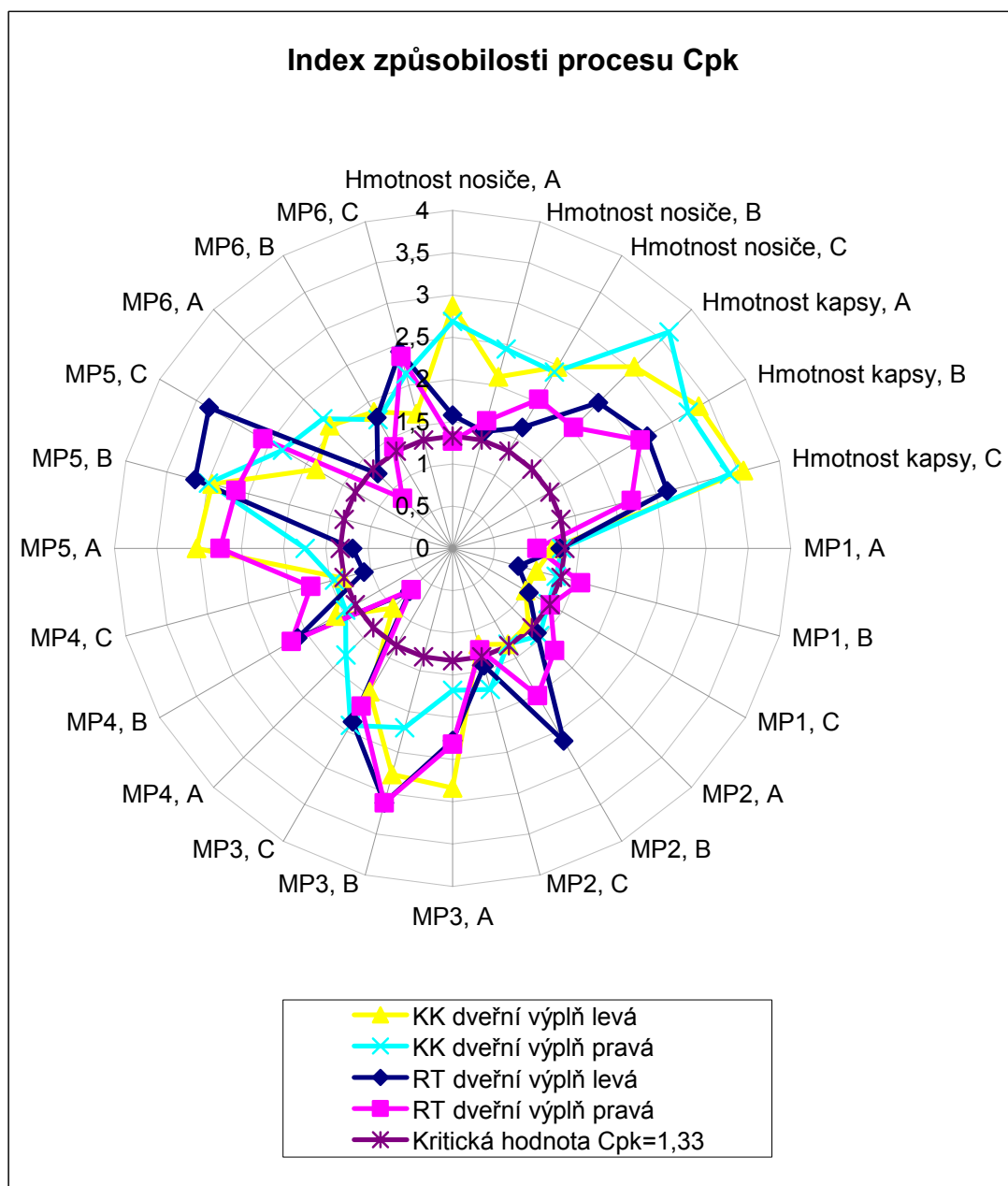
Požadavky na způsobilost procesu se většinou vztahují především k hodnotě indexu způsobilosti procesu C_{pk} . Minimální hodnota indexu C_{pk} , při které je proces považován v současné době za způsobilý, je $C_{pk} = 1,33$ [9].



Obr. 93. Schéma měřených rozměrových parametrů pro hodnocení způsobilosti procesu v případě krátkodobých zkoušek



Obr. 94. Index způsobilosti procesu C_p u krátkodobých zkoušek pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), s materiály A, B a C



Obr. 95. Index způsobilosti procesu C_{pk} u krátkodobých zkoušek pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), s materiály A, B a C

Pro představu o rozdílné způsobilosti vstřikovacích procesů analyzovaných technologií byly procentuálně porovnány plochy vymezené hodnotami indexů způsobilosti procesu pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování a technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje,

rozdělenými na dveřní výplň levou a dveřní výplň pravou, viz tabulka 14. Na základě tohoto porovnání lze konstatovat, že vstřikovací proces s technologií konvenčního kaskádového vstřikování je stabilnější. Tím jsou potvrzeny předpoklady z analýzy vstřikovacího procesu v kapitole 3.6, že technologie konvenčního kaskádového vstřikování je vlivem menší variability hodnot tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku ve srovnání s technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje stabilnější.

Tab. 14. Celkové procentuální porovnání ploch vymezených hodnotami indexů způsobilosti procesu pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

	KK		RT	
	dveřní výplň levá	dveřní výplň pravá	dveřní výplň levá	dveřní výplň pravá
C_p	100,0 %	99,2 %	95,5 %	98,5 %
C_{pk}	98,2 %	100,0 %	91,1 %	90,0 %

Pokud je do porovnání indexů způsobilosti procesu zahrnut pouze parametr hmotnosti vystříknutých dílů, jehož měření je z měřených parametrů nejvíce reprodukovatelné, pak jsou rozdíly ve způsobilostech procesů markantnější (viz tab. 15). Indexy způsobilosti procesu vycházejí vždy vyšší pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování, přičemž největšího rozdílu v indexech způsobilosti procesu vztažených ke hmotnosti výstřiků je dosaženo u parametru hmotnosti levé kapsy, kde je rozdíl v hodnotě indexu C_p mezi jednotlivými technologiemi 42 %.

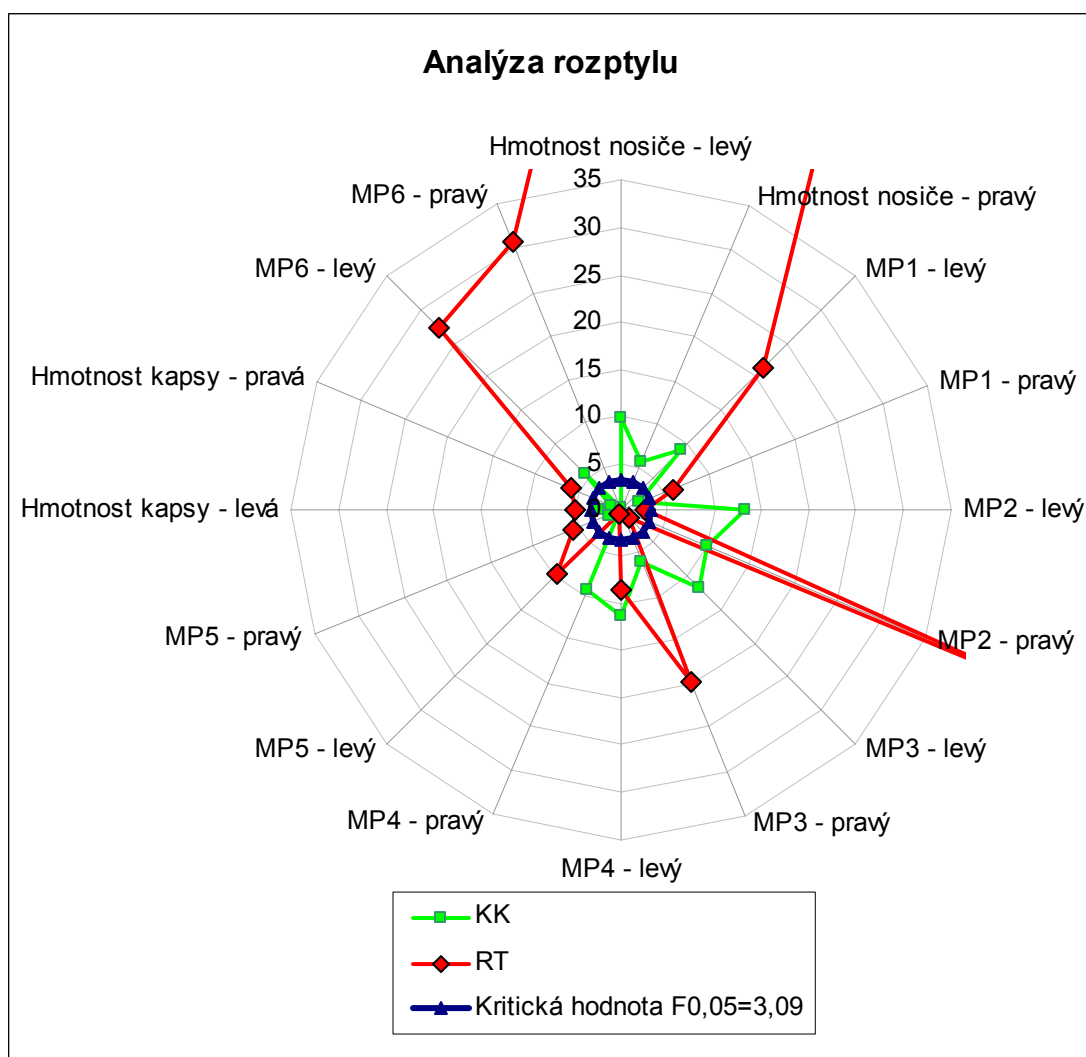
Tab. 15. Procentuální porovnání ploch vymezených hodnotami indexů způsobilosti procesu vzhledem ke hmotnosti výstřiků pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

	KK		RT	
	dveřní výplň levá	dveřní výplň pravá	dveřní výplň levá	dveřní výplň pravá
C_p	100,0 %	98,9 %	78,1 %	75,4 %
C_{pk}	98,0 %	100,0 %	69,7 %	65,5 %

3.9.3 Analýza rozptylu naměřených hodnot

Záměrem použití analýzy rozptylu naměřených hodnot v experimentu je posouzení, zda jsou rozdíly naměřených hodnot během analyzování výstřiků z krátkodobých zkoušek s materiály A, B a C v rámci jedné technologie významné, tedy zda má druh vstřikovaného materiálu vliv na vlastnosti výrobku vyrobeného danou technologií. K analýze rozptylu bylo využito všech 35 měření pro každý parametr v dané sérii z krátkodobých zkoušek.

Pro zjištění významnosti variability hodnot byly naměřené hodnoty podrobeny analýze rozptylu při jednoduchém třídění, přičemž analyzovaným faktorem byl rozdílný materiál použitý při vstřikování.



Obr. 96. Analýza rozptylu hodnot měřených parametrů při způsobilosti procesu pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT), s materiály A, B a C

Obr. 96 představuje výsledek analýzy rozptylu při jednoduchém třídění, kde hodnoty testovacího kritéria větší než kritická hodnota $F_{0,05}(2,102) = 3,09$ značí, že vliv faktoru je významný, zatímco pod touto kritickou hodnotou je variabilita naměřených hodnot ovlivněna pouze náhodnými vlivy. Hodnoty testovacího kritéria jsou zaznamenány v příloze 4.

Z analýzy rozptylu hodnot vyplývá, že v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování se více jak u poloviny parametrů projevil vliv druhu vstřikovaného materiálu na vlastnosti výrobků a u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje se vliv druhu materiálu projevil téměř u všech měřených parametrů.

Z procentuálního porovnání ploch vymezených v grafu analýzy rozptylu hodnotami testovacího kritéria je možné konstatovat, že v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování je vliv druhu materiálu menší, než u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (viz tab. 16).

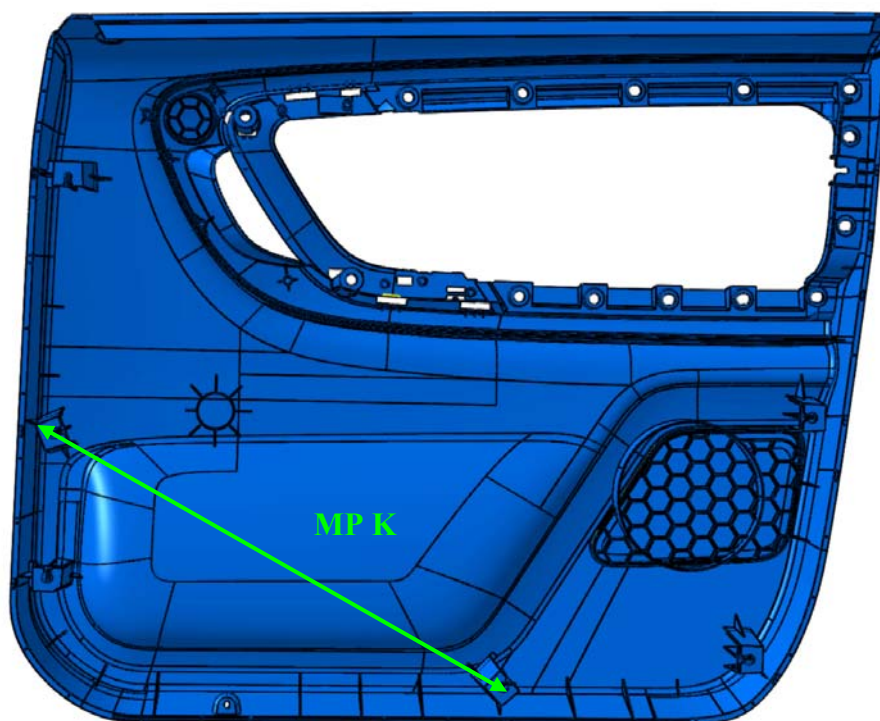
Tab. 16. Procentuální porovnání ploch vyhraničených testovacími kritérii pro technologii konvenční kaskády (KK) a řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

	KK	RT
Procentuální porovnání ploch vyhraničených testovacími kritérii	27,3 %	100 %

3.9.4 Hodnocení způsobilosti vstřikovacího procesu

Pro ověření analýz způsobilosti procesu provedených během experimentu byly obě technologie nasazeny ve výrobním provozu při sériové výrobě, každá technologie byla v praxi sledována po dobu tří měsíců. Po tuto dobu byly odebrány podskupiny vzorků po pěti za sebou jdoucích výrobcích pro stanovení indexů způsobilosti C_p , C_{pk} . Sledovaným parametrem při těchto dlouhodobých analýzách byl rozměr „MP K“ (viz obr. 97) určený dle plánu kontroly a řízení společnosti Cadence Innovation. Podskupiny byly pro zajištění ustálenosti výrobního procesu odebrány vždy od 15. zdvihu od začátku výroby.

Naměřené hodnoty během dlouhodobých analýz jsou zaznamenány v příloze 5 pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování a v příloze 6 pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. Vyhodnocená data měření provedených v praxi včetně indexů způsobilosti jsou zachycena v tabulce 17 pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování a v tabulce 18 pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. Pro přehlednost jsou výsledné indexy způsobilosti procesu dlouhodobých zkoušek vyneseny graficky v obr. 98.



Obr. 97. Schéma měřeného parametru pro hodnocení způsobilosti procesu

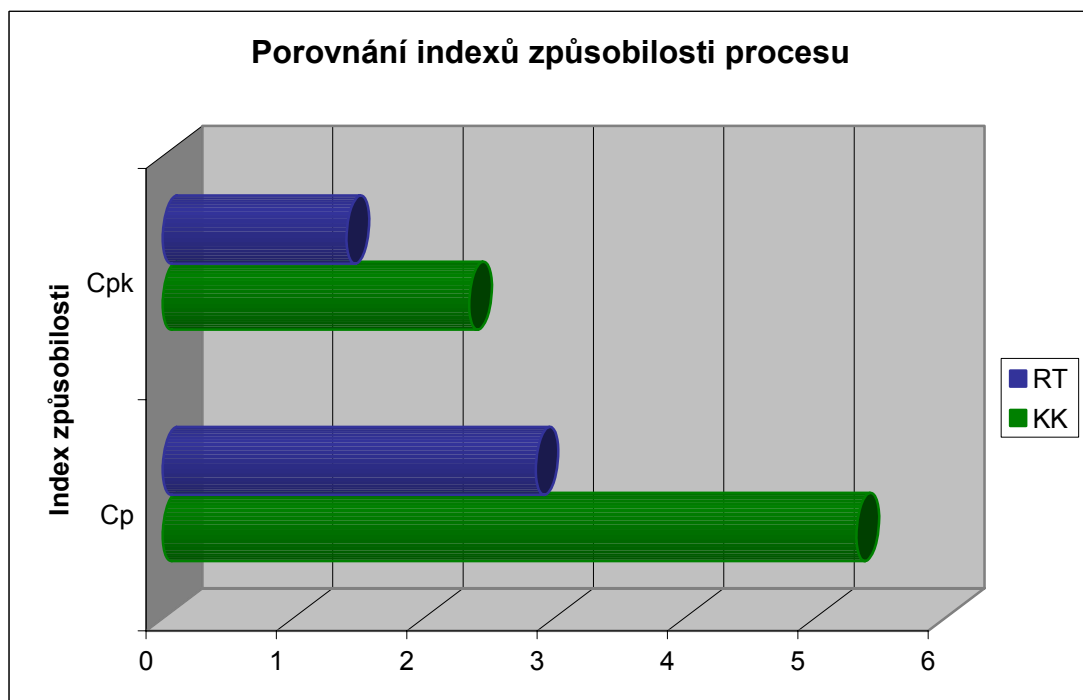
Tab. 17. Způsobilost procesu v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování

maximální hodnota = 651,57	USL = 651,80	
\bar{x} = 651,45	LSL = 650,20	
minimální hodnota = 650,20	C_p = 5,32	C_p je vyhovující.
jmenovitá hodnota = 651,00	C_{pL} = 2,35	C_{pU} = 8,29
počet záznamů = 125	C_{pk} = 2,35	C_{pk} je vyhovující.
Způsobilost procesu vyhovuje.		

Tab. 18. Způsobilost procesu v případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

maximální hodnota = 651,64	USL = 651,80	
\bar{x} = 651,40	LSL = 650,20	
minimální hodnota = 650,24	C_p = 2,86	C_p je vyhovující.
jmenovitá hodnota = 651,00	C_{pL} = 1,41	C_{pU} = 4,30
počet záznamů = 125	C_{pk} = 1,41	C_{pk} je vyhovující.
Způsobilost procesu vyhovuje.		

Na základě porovnání indexů způsobilosti procesu analyzovaných technologií stanovených při výrobním procesu v praxi je možné konstatovat, že u obou technologií je proces způsobilý, přičemž vyšších hodnot indexů způsobilosti procesu je dosaženo při nasazení technologie konvenčního kaskádového vstřikování, která dosáhla o 48 % vyšší hodnoty indexu C_p a o 40 % vyšší hodnoty indexu C_{pk} oproti technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. Technologie konvenčního kaskádového vstřikování je tedy z pohledu provedené analýzy způsobilosti procesu stabilnější, než technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.



Obr. 98. Porovnání způsobilosti procesu pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování (KK) a řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (RT)

3.10 Diskuze výsledků experimentálního měření

Během experimentálních měření byly porovnávány dvě technologie vstřikování plastů. Analyzována byla technologie konvenčního kaskádového vstřikování využívající tzv. řízeného vstřiku, tedy řízení objemu taveniny vstřikovaného do dutiny nástroje, a nová technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. Tato nová technologie spočívá v řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému na základě předem nastaveného tlakového profilu v závislosti na čase pro každou trysku horkého rozvodu zvlášť. Výsledky analýz disertační práce sloužily k dalšímu vyvíjení této nové technologie.

V rámci experimentu byly ke vstřikování používány tři druhy materiálu pro analyzování vlivu různých aditiv a množství regranulátu na vstřikovací proces.

První materiál byl tvořen základním materiálem Daplen EE137HP s příměsí 3% barviva Onyx 10-9816F/PP. Druhý materiál je obdobný předešlému materiálu, ovšem místo barviva Onyx bylo použito 3 % příměsí barviva Silbergrau 10-80069F/PP. Třetí materiál se skládal z 67 % materiálu EE137HP, 3 % aditiva Onyx 10-9816 F/PP a 30 % regranulátu tohoto materiálu.

Rozbor vstřikovacího procesu

Pro analyzování samotného vstřikovacího procesu byly vstřikovány s výše uvedenými třemi materiály každou technologií série o 35 za sebou jdoucích zdvích. Při vstřikování těchto sérií byl snímán systémový tlak, poloha šneku a tlak v dutině nástroje v závislosti na čase.

Naměřené parametry pozice šneku odpovídaly požadovaným profilům rychlosti pohybu šneku nastavených na stroji, přičemž průběh systémového tlaku se podle očekávání projevil jako důsledek požadované vstřikovací rychlosti během vstřikovacího procesu.

Nejvýznamnějším měřeným parametrem z pohledu analýzy dějů při vstřikování je kromě průběhu polohy šneku průběh tlaku v dutině nástroje.

U obou technologií dosahovala tlaková maxima u průběhů tlaků v dutině nástroje obdobných hodnot. Tlakové průběhy vykazovaly variabilitu hodnot tlaku mezi jednotlivými zdvihy v rámci jedné série, zejména ve fázi dotlaku. U technologie konvenčního kaskádového vstřikování byly naměřeny hodnoty průběhu tlaku jednotlivých zdvihů na konci fáze dotlaku s rozpětím o dvě třetiny menším, než

u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, z čehož je možné usuzovat, že technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje dosahuje menší stability procesu.

Rozdíly ve stabilitě vstřikovacího procesu analyzovaných technologií jsou patrně způsobeny rozdílným druhem řízení procesu. U technologie konvenčního kaskádového vstřikování je proces řízen tzv. objemovým řízením vstřikovacího procesu, kdy je stanoveno, jak rychle se má daný objem taveniny vstříknout do dutiny nástroje. Oproti tomu je u technologie řízení tlaku taveniny na tryskách vtokového systému vstřikovacího nástroje proces řízen závislostí tlaku taveniny na čase, a nedokáže tak reagovat na reologické chování tavenin plastů, především pak na změny viskozity s teplotou, respektive se smykovou rychlostí.

Softwarová simulace

Experimentální měření v rámci disertační práce byla doprovázena simulacemi prováděnými softwarem Moldflow Plastics Insight 6.1, který umožňuje simulovat vstřikovací proces jak s technologií konvenčního kaskádového vstřikování, tak s technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

Softwarové simulace byly zaměřeny na postup plnění dutiny nástroje taveninou a na výpočty sloužící k analýze tlakových poměrů ve vstřikovacím nástroji.

V případě analýzy postupu plnění dutiny vstřikovacího nástroje taveninou odpovídala simulace téměř realitě jak z pohledu dráhy toku taveniny, tak z pohledu času fáze vstřiku a dotlaku.

Analýzy tlakových poměrů byly směřovány k rozboru průběhů tlaků na jednotlivých tryskách horkého rozvodu a tlaků uvnitř dutiny nástroje během plnění dutiny vstřikovacího nástroje taveninou. Tyto simulace umožnily získat komplexní představu o dějích ve vstřikovacím nástroji, které byly při reálném procesu omezeny pouze na jeden měřený bod v dutině nástroje.

Při porovnání tlakového průběhu měřeného při skutečném vstřikování a tlakového průběhu u simulovaného procesu dosahuje simulace přesnosti vyšší jak 70% z pohledu tlakových hodnot a téměř 95 % z pohledu časového průběhu procesu vstřikování.

Průběhy tlaku ve vtokovém systému u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje odpovídaly zcela přesně zadaným tlakovým křivkám. U technologie konvenčního kaskádového vstřikování byl, i přes trojnásobné zvýšení vstřikovací rychlosti v okamžiku otevření trysek, zaznamenán pokles tlaku taveniny ve vtokovém systému při otvírání trysek kaskády vstřikovacího nástroje.

Během rozboru simulovaných tlakových poměrů uvnitř dutiny nástroje bylo zjištěno, že u obou technologií klesá tlak v dutině nástroje na konci fáze dotlaku v závislosti na zvětšující se dráze toku taveniny v dutině nástroje. V případě použití technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje se tlak v měřených místech dutiny nástroje na konci fáze dotlaku lišil v poměru maximální a minimální hodnoty o 25 %. Zatímco hodnoty tlaku ve fázi dotlaku u technologie konvenčního kaskádového vstřikování se lišily o 57 %.

Pro tento jev byly na základě výsledků simulace stanoveny vztahy pro závislost tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku na dráze toku taveniny v dutině nástroje pro analyzovaný výrobek:

- pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování

$$p_{fd} = -0,4999 \cdot s_v + 364,17 \quad (19)$$

- pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

$$p_{fd} = -0,0924 \cdot s_v + 266,2 \quad (20)$$

kde p_{fd} je tlak v dutině nástroje na konci fáze dotlaku,
 s_v je dráha toku taveniny v dutině nástroje.

V případě konvenční technologie klesá tlak v dutině nástroje na konci fáze dotlaku 0,5 násobně se zvětšující se dráhou toku taveniny, na rozdíl od technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, kde je pokles tlaku pozvolnější, a to 0,09 násobně s rostoucí dráhou toku taveniny.

Z těchto poznatků je možné vytvořit závěr, že v případě použití technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je dutina nástroje plněna rovnoměrněji a tlak v dutině nástroje na konci fáze dotlaku nevykazuje tak velké rozdíly jako při běžném vstřikování, což následně může vést i k menším rozdílům ve vlastnostech výstřiku napříč jeho plochou a k menším vnitřním pnutím výstřiku.

Homogenita mechanických vlastností

Pro hodnocení homogenity mechanických vlastností výstřiků bylo využito stanovení pevnosti ve střihu v různých místech výstřiku. Nejvyšší naměřené hodnoty pevnosti ve střihu byly v blízkosti vtoků, s rostoucí dráhou toku taveniny v dutině nástroje hodnota pevnosti ve střihu klesala.

Lineární regresí naměřených hodnot pevnosti ve střihu v závislosti na dráze toku taveniny v dutině nástroje byly získány vztahy:

- pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování

$$\tau_s = -0,0087 \cdot s_v + 33,053 \quad (21)$$

- pro technologii řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

$$\tau_s = -0,0042 \cdot s_v + 30,908 \quad (22)$$

kde τ_s je pevnost ve střihu,

s_v je dráha toku taveniny v dutině nástroje.

Klesání pevnosti ve střihu je tedy pozvolnější u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, což je patrně důsledkem rovnoměrnějších podmínek plnění dutiny vstřikovacího nástroje taveninou, kdy rozdíly tlaku v dutině nástroje jsou menší než u technologie konvenčního kaskádového vstřikování.

Na základě analýzy tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku a pevnosti ve střihu byly sestaveny 3D grafy, představující závislost dráhy toku taveniny v dutině nástroje na tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku a pevnosti ve střihu (viz obr. 88 a 89). Rovněž z těchto grafů je zřejmé, že dráha toku taveniny roste s klesajícími hodnotami obou parametrů. V případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je zvětšování dráhy toku taveniny se zmenšujícími se hodnotami tlaku v dutině na konci fáze dotlaku a pevnosti ve střihu v daném rozpětí hodnot strmější než u technologie konvenčního kaskádového vstřikování, což představuje větší rozsah dráhy toku v závislosti na daném rozsahu obou parametrů. U technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje je tedy z pohledu tlaku v dutině nástroje na konci fáze dotlaku plnění dutiny rovnoměrnější a mechanické vlastnosti v ploše výstřiku jsou homogennější než u technologie konvenčního kaskádového vstřikování.

Vnitřní pnutí výstřiků

Mezi dílčí část experimentu bylo zahrnuto analyzování vnitřního pnutí výrobků. Lze konstatovat, že i v dnešní době je stanovení vnitřního pnutí výstřiků velmi obtížnou záležitostí. Ze všech použitých metod podala nejprokazatelnější výsledky metoda založená na měření deformace dílů během výrobního smrštění. U této metody díly vystříknuté technologií konvenčního kaskádového vstřikování vykazovaly větší změny ve tvaru dílu.

Za předpokladu, že výrobky byly vstřikovány oběma technologiemi za maximálně stejných podmínek i s ohledem na princip plnění dutiny nástroje, je možné předpokládat, že měřená deformace dílů po výrobním smrštění je odrazem vnitřních pnutí. V tom případě by vnitřní pnutí v dílech vyrobených technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje bylo menší.

Hodnocení způsobilosti procesu

K analyzování způsobilosti procesu bylo využito hodnocení pomocí stanovení indexů způsobilosti procesu. Způsobilost procesů byla hodnocena ze dvou pohledů, a to z pohledu krátkodobých zkoušek a zkoušek dlouhodobých.

U krátkodobých zkoušek byly analyzovány díly vystříknuté pro analýzu vstřikovacího procesu. V tomto případě byla způsobilost procesu stanovována vždy na základě 35 měření pro různé parametry rozměrů výstřiků a jejich hmotnosti. V případě dlouhodobých zkoušek byly obě technologie nasazeny při výrobě v praxi v reálném výrobním provozu, každá po dobu tří měsíců.

Obě analýzy způsobilosti hovoří kladně pro technologii konvenčního kaskádového vstřikování, kde bylo dosahováno vyšší stability procesu.

V případě hodnocení způsobilosti procesu u dlouhodobých zkoušek byla hodnota indexu $C_{pk}=1,41$ u technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje a $C_{pk}=2,35$ u nasazení technologie konvenčního kaskádového vstřikování. Tyto výsledky korespondují se závěry z rozboru vstřikovacího procesu o předpokládané vyšší stabilitě technologie konvenčního kaskádového vstřikování.

Z rozboru vlastností výstřiků u krátkodobých zkoušek je dále možné konstatovat, že na výrobky vyrobené oběma technologiemi má vliv druh použitého materiálu. V porovnání technologií bylo zjištěno, že vliv materiálu na vlastnosti výstřiku je menší u technologie konvenčního kaskádového vstřikování.

4 ZÁVĚR

Všechny oblasti lidské činnosti se neustále rozvíjejí a zdokonalují. Nejinak je tomu i v oblasti vstřikování plastů. Snaha oslovit pokud možno co nejvíce zákazníků a prosadit se na celosvětovém trhu mezi velmi vyspělou a kvalitní konkurencí výrobců plastových dílů vede ke zkracování výrobních cyklů, zvyšování stability výrobního procesu pro zajištění menší zmetkovitosti a zároveň ke zvyšování kvality často tvarově složitých výrobků, jejichž vyrobiteľnost se pohybuje na samé hranici možností běžné technologie vstřikování plastů.

Požadavky trhu a konkurenční tlak na výrobce plastových dílů se přímo odráží v požadavcích na samotnou technologii vstřikování, což vede k hledání nových postupů zdokonalujících tuto technologii nejen v rozšiřování možností vyrobiteľnosti složitých tvarů, ale i cest vedoucích ke zvyšování reprodukovatelnosti kvalitních výstřiků.

V předložené disertační práci je analyzována nová technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje, která si klade za cíl jak rozšíření možností technologie vstřikování, tak zvýšení stability výroby a otevírá zcela nový pohled na technologii vstřikování plastů především v případě složitých velkorozměrných dílů. Tato nová technologie byla během experimentů prováděných v rámci disertační práce dále vyvíjena tak, aby splňovala požadavky kladené na technologii vstřikování plastů v reálném výrobním procesu.

Předností technologie je řízení vstřikovacího procesu u vícevtokového horkého systému vstřikovacího nástroje pomocí regulace tlaku taveniny na jednotlivých tryskách vtokového systému. Vstřikovací stroj působí u této nové technologie pouze jako dodavatel taveniny pod tlakem vyšším, než je potřebný tlak vycházející z požadovaných tlakových profilů na jednotlivých tryskách.

Naproti tomu u technologie konvenčního kaskádového vstřikování je proces řízen vstřikovacím strojem a možnost řízení vtokového systému vstřikovacího nástroje je omezena pouze na otevírání či uzavírání jednotlivých vtoků během plnění dutiny vstřikovacího nástroje taveninou.

V první, teoretické, části se disertační práce zabývá rozбором procesu plnění dutiny nástroje taveninou, vlivy technologických parametrů na technologii vstřikování plastů a porovnáním způsobů řízení vstřikovacího procesu. V neposlední

radě je pak v teoretické části popsán princip nové technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

Experimentální část disertační práce je zaměřena na rozbor a porovnání vstřikovacího procesu obou technologií, tedy technologie konvenčního kaskádového vstřikování i technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje. K analyzování bylo využito snímání průběhu vnitřního tlaku v dutině nástroje, systémového tlaku a polohy šneku během vstřikování s různými druhy materiálů. Dále je analyzován vliv technologií na vlastnosti výstřiků. V rámci porovnání technologií z hlediska stability procesu byly pro obě technologie hodnoceny způsobilosti procesu jak během experimentálního měření, tak v praxi za reálných výrobních podmínek. Experimentální měření byla doprovázena softwarovými simulacemi obou technologií zaměřenými především na tlakové poměry ve vtokovém systému a v dutině nástroje. Výsledky experimentálních měření lze shrnout do dvou hlavních bodů:

- Technologie konvenčního kaskádového vstřikování dosahuje vyšší stability procesu a analyzované druhy materiálu mají menší vliv na vlastnosti výstřiků v porovnání s novou technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.
- Díly vyrobené technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje vykazují menší variabilitu mechanických vlastností v ploše dílu a je možné usuzovat, že tyto díly mají i menší vnitřní pnutí.

Přínos pro praxi a vědu

Potenciál nové technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

Na základě důkladných analýz nové technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje a jejím porovnáním s běžnou technologií konvenčního kaskádového vstřikování je možné konstatovat, že mezi přínosy a potenciály nové technologie patří:

- 👍 vstřikování dílů s homogenními vlastnostmi v celém výrobku,
- 👍 vstřikování s využitím family nástrojů s dutinami vyžadujícími rozdílné podmínky plnění nástroje. Příkladem z praxe může být

family nástroj pro přístrojovou desku a díly pro schránku u spolujezdce.

- 👍 flexibilita vstřikovacího procesu vzhledem k vstřikovacímu stroji, který u této technologie má pouze funkci dodavatele taveniny pod určitým tlakem. Není zde tedy například významný vliv opotřebení vstřikovací jednotky stroje na vstřikovací proces.
- 👍 flexibilita vstřikovacího procesu při využití vícenásobných a family nástrojů, kde systém umožňuje uzavření jednotlivých trysek vtokového systému bez ovlivnění tlakových poměrů na ostatních tryskách. V praxi je tato možnost výhodou v případě potřeby vyrábět pouze díly z určitých dutin family nástrojů, přičemž je nutné brát zřetel na možnou degradaci taveniny v kanálech vtokového systému pro příslušné uzavřené trysky.

Slabými stránkami technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje jsou:

- 👎 způsob řízení trysek horkého rozvodu pomocí tlaku taveniny v závislosti na čase, který nedokáže korigovat změny vlastností taveniny zapříčiněné reologickým chováním tavenin plastů, a to především změn viskozity v závislosti na teplotě a smykové rychlosti. Z tohoto důvodu nedokáže prozatím tato nová technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje konkurovat konvenční technologii kaskádového vstřikování ve stabilitě vstřikovacího procesu.
- 👎 vyšší požadavky na údržbu a vzdělání obsluhujícího personálu.

Uplatnění výsledků disertační práce v praxi

Na základě přípravy, seřízení a provedených analýz obou technologií pro nový koncept vstřikování s family nástroji je nyní při vstřikování s obdobnými vstřikovacími nástroji pro všechny modely dveřních výplní Škody Roomster a Škody Fabia druhé generace s výhodou použito ve společnosti Cadence Innovation - Libáň pouze technologie konvenčního kaskádového vstřikování. I přes poměrně náročný

vstřikovací proces není díky seřízení technologie konvenčního kaskádového vstřikování během experimentálního měření zapotřebí využití potenciálů nové technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje.

Další postupy

Další postupy experimentů s novou technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje spadají především do oblasti hledání nového způsobu řízení trysek horkého rozvodu. Experimenty jsou směřovány k řízení trysek vstřikovacího nástroje obdobou řízení procesu objemového vstřikování, jako je tomu u běžné technologie vstřikování. V současné době jsou připravovány analýzy vstřikovacího procesu, kde jsou trysky řízeny pomocí referenčních křivek závislosti tlaku taveniny na poloze šneku. Ovšem ani od tohoto konceptu řízení trysek horkého rozvodu vstřikovacího nástroje nelze očekávat uspokojivé řešení problému s nestabilitou výroby a s necitlivostí této nové technologie na reologické chování tavenin plastů.

Dalšími postupy jsou:

- Rozbor vstřikovacího procesu při vstřikování s uzavřenými tryskami pro určité dutiny vstřikovacího family nástroje.
- Analýza možností seřízení trysek vtokového systému s cílem dosažení rovnoměrného plnění velkorozměrových dílů, které vede ke konstantním vlastnostem v ploše výstřiku.
- Rozbor vstřikovacího procesu s family nástroji obsahujícími dutiny, které vyžadují razantně odlišné způsoby plnění.
- Analýza závislosti vlastností výstřiku na dráze toku taveniny ve vstřikovacím nástroji.
- Vývoj metody pro analyzování vnitřního pnutí v plastových dílech, která je modifikací odvrtávací metody, kdy otvor není vytvořen odvrtávacím nástrojem, ale prostřížením.



5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Johannaber, F., Michaeli, W. *Handbuch Spritzgießen*. München: Carl Hanser Verlag, 2004. ISBN 3-446-22966-3.
- [2] Gesce, U.W. *Polymer Physics*. Dordrecht: Kluwe Academic Publisher, 1999. ISBN 0-412-62640-3.
- [3] Roseto, V. *Injection Molding Handbook*. Norwell: Kluwer Academic Publisher, 2000. ISBN 0-7923-8619-1.
- [4] Krebs, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-449-8.
- [5] Osswald, A.T., Menges, G. *Materials Science of Polymers for Engineers*. Munich: Hanser Publisher, 2003. ISBN 1569903484.
- [6] Pačt, R. *Vliv řízení dotlaku a viskozity taveniny na kvalitu dílů z plastů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [7] Ulík, J. *Monitorovanie priebehu tlaku v nástroji při vstrekování plastov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2005.
- [8] Půta, J. *Hodnocení efektivnosti temperace vstřikovacích forem*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [9] Plura, J. *Plánování a neustálé zlepšování jakosti*. Praha: Computer press, 2001. ISBN 80-7226-543-1.
- [10] Horálek, V. *QS-9000 SPC*. Praha: Česká společnost pro jakost, 1999. ISBN 80-02-01293-3.
- [11] Kadeřábek, J. *Pravděpodobnost a statistika*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1979.
- [12] Krebs, J. *Vliv podmínek vstřikování na vlastnosti výstřiků z termoplastů*. Liberec: VŠST, 1967.
- [13] Michaeli, W. *Plastics Processing: An Introduction*. Munich: Hanser Publ., 1995. ISBN 9781569901441.
- [14] Rosen, S.L. *Fundamental Principles of Polymeric Materials*. New York: Wiley, 1993. ISBN 978-0-471-57525-2.
- [15] Sobotka, Z. *Reologie hmot a konstrukcí*. Praha: Academia, ČSAV, 1981.
- [16] Krebs, J. *Termoplasty v praxi*. Praha: Dashofer, 2004. ISBN 80-86229-15-7.



- [17] Lenfeld, P. *Technologie II – 2. část (Zpracování plastů)*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-037-X.
- [18] Roseto, D.V. *Plastics Processing Data Handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. ISBN 978-0412801907.
- [19] Krebs, J. *Teorie a technologie zpracování plastů*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, Liberec, 1981.
- [20] Friedrich, J. *Injection Molding Machines*. Munich: Hanser Publisher, 2007. ISBN 1569904189.
- [21] Šafařík, V. *Nástroje pro tváření kovů a plastů*. Liberec: VŠST Liberec, 1991. ISBN 80-7083-014-X.
- [22] Hendrych, J., Weber, A., Doležal, J. *Standardizace rámců a součástí forem pro vstřikování termoplastů*. Praha: SNTL, Praha, 1986.
- [23] Meissner, B., Zilvar, V. *Fyzika polymerů*. Praha: SNTL, 1987.
- [24] Kolouch, J. *Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním*. Praha: SNTL, 1986.
- [25] Malloy, R.A. *Plastic Part Design for Injection Molding*. New York: Hanser, 1994. ISBN 1-56990-129-5.
- [26] Beiter, K., Ishii, K. Incorporating Dimensional Requirements into Material Selection and Design of Injection Molded Parts. In *ASME Design Engineering Technical Conference - Design Automation Conference, September 1996*. Stanford: Irvine, CA, 1996.
- [27] Bader, Ch. Und sie bewegt sich doch. *Kunststoffe*, 2008, č. 6, s. 60-66.
- [28] Wippenbeck, P. Das Licht auf dem Schell. *Kunststoffe*, 2006, č. 1, s. 82-88.
- [29] Michaeli, W. E. H., Cramer, A. Bessere Oberflächen. Beim Schaumspritzgießen. *Kunststoffe*, 2006, č. 12, s. 21-27.
- [30] Wortberg, J., Kamps, T. Hydraulische und elektro-mechanische Spritzgießmaschinen in der Praxis. *Kunststoffe*, 2002, č. 7, s. 36-42.
- [31] Stewart, J. Das Beste aus beiden Welten. *Kunststoffe*, 2006, č. 7, s. 72-75.
- [32] Michaeli, W. E. H., Hopmann, Ch., Gruber, J. Prozessregelung beim Spritzgießen. *Kunststoffe*, 2004, č. 1, s. 20-24.
- [33] Bürkle, E., Klotz, B., Schnerr, O. Der gläserne Innendruck. *Kunststoffe*, 2007, č. 5, s. 26-31.



- [34] Půta, J., Schreyer, H.J. Online Plastics Melt – Pressure Control in the Injection Technology. In *4th International PhD Conference on Mechanical Engineering – PhD2006, Plzeň 11.-13.9.2006*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006, s. 75-76. ISBN 80-7043-486-4.
- [35] Krebs, J. Hodnocení mechanických vlastností houževnatých termoplastů podle pevnosti ve střihu. *Plastické hmoty a kaučuk*, 1970, č. 4, s. 106-109.
- [36] Svoboda, V. Použití tlakových snímačů Kistler při optimalizaci vstřikovacího procesu. In *Vstřikování plastů, 9. mezinárodní konference, Praha 2002*. Praha: Plast Form Service s.r.o., 2002, s. 96-103.
- [37] Interní dokumentace společnosti Cadence Innovation
- [38] Prospektová dokumentace firmy Kistler
- [39] www.priamus.com
- [40] www.ewikon.com
- [41] www.kistler.com
- [42] www.netsal.com
- [43] www.ikv-aachen.de
- [44] www.engelglobal.com
- [45] www.intellimold.com
- [46] www.synventive.com



6 SEZNAM PUBLIKACÍ

1. Lenfeld, P., Půta, J., Ausperger, A., Běhálek, L. Efficiency Cooling Increasing of Injection Moulds. In *The 6th Central European scientific – technical conference for plastic branch entitled “Advances in plastic technology - APT 05”, Katowice 15.-17.11.2005*. Katowice: Instytut Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych “Metalchem”, 2005. ISBN 83-917693-4-8.
2. Půta, J. Detection of the Plastics Parts Temperature Field by means of the Thermo-vision Measuring and Software Analyses. In *Pro-tech-ma 06, Acta Mechanica Slovaca, Košice 28.-30.6.2006*. Košice: TU v Košiciach, 2006, s. 331-334. ISSN 1335-2393.
3. Půta, J., Schreyer, H.J. Online Melt – Pressure Control inside Hot Runner Systems. In *Junior Euromat 2006, Lausanne 4.-8.9. 2006*. Lausanne, 2006.
4. Půta, J., Schreyer, H.J. Online Plastics Melt – Pressure Control in the Injection Technology. In *4th International PhD Conference on Mechanical Engineering – PhD2006, Plzeň 1.1-13.9.2006*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006, s. 75-76. ISBN 80-7043-486-4.
5. Půta, J. Regulation of Melt Pressure in Injection Technology. In *Plastics – Engineering Materials, Praha 15.-16.3.2007*. Praha: Plast Form Service, s.r.o., 2007, s. 139-143. ISSN 1213-2640.
6. Půta, J. Pressure Control of the Melt in the Injection Technology. In *Junior Euromat 2007, Nürnberg 10.-13.9.2007*. Nürnberg, 2007.
7. Půta, J. Family Moulds in Injection Technology. In *Recenzovaný sborník, Mezinárodní Baťovy Doktorandské Konference, Zlín 12.4.2007*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, s. 261. ISBN 978-80-7318-529-9.
8. Půta, J. Reading of the Inner Cavity Pressure in Injection Technology. In *International Science Conference of Materials Science and Manufacturing Technology, Praha 26.-27.6.2007*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2007, s. 239-241. ISBN 978-80-213-1650-8.



9. Půta, J. Employment the Feed System with Closable Edges by Family Moulds in Injection Technology. In *Erin 2007, Bratislava 25.-26.4.2007*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2007, s. 54.
ISBN 978-80-227-2636-8.
10. Půta, J. Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacích nástrojů. In *Formy Brno 07, Brno 7.6.2007*. Brno: Uniplast Brno, 2007.
Vyžádaná přednáška
11. Půta, J. Influence the Parameters of Closable Edges the Family Mould on Melt Cavity Pressure. In *6th International Conference of PhD Student, Miskolc 12.-18.8.2007*. Miskolc: University of Miskolc, 2007, s.121-124.
ISBN 978-963-661-779-0.
12. Půta, J. Influence of the Ram Speed over the Cascade Injection Technology. In *Technology 2007, Bratislava 19.-20.9.2007*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2007, s. 445-448.
ISBN 978-80-227-2712-9.
13. Půta, J. Software Analysis of Cascade Family Moulds Injection. In *5th International PhD Conference on Mechanical Engineering – PhD2007, Plzeň 6.-8.9.2007*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007, s. 229-232.
ISBN 978-80-7043-597-7.
14. Půta, J., Ausperger, A., Běhálek, L., Lenfeld, P. Family Moulds Injection with the Dynamic Feed Technology. In *Technomer 2007, Chemnitz 15.-17.11.2007*. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2007, s. 142.
ISBN 978-3939382-08-09.
15. Půta, J., Lenfeld, P., Seidl, M. Pressure Balances in the Cascade Injection Technology. In *Vstřikování plastů, Praha 13.-14.3.2008*. Praha: Plast Form Service, s.r.o., 2008, s. 177-182.
ISSN 1213-2632.
16. Ausperger, A., Běhálek, L., Lenfeld, P., Půta, J. The Virtual Analysis of Gates for Injection Molding of Polypropylene. In *Technomer 2007, Chemnitz 15.-17.11.2007*. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2007, s. 148.
ISBN 978-3939382-08-09.



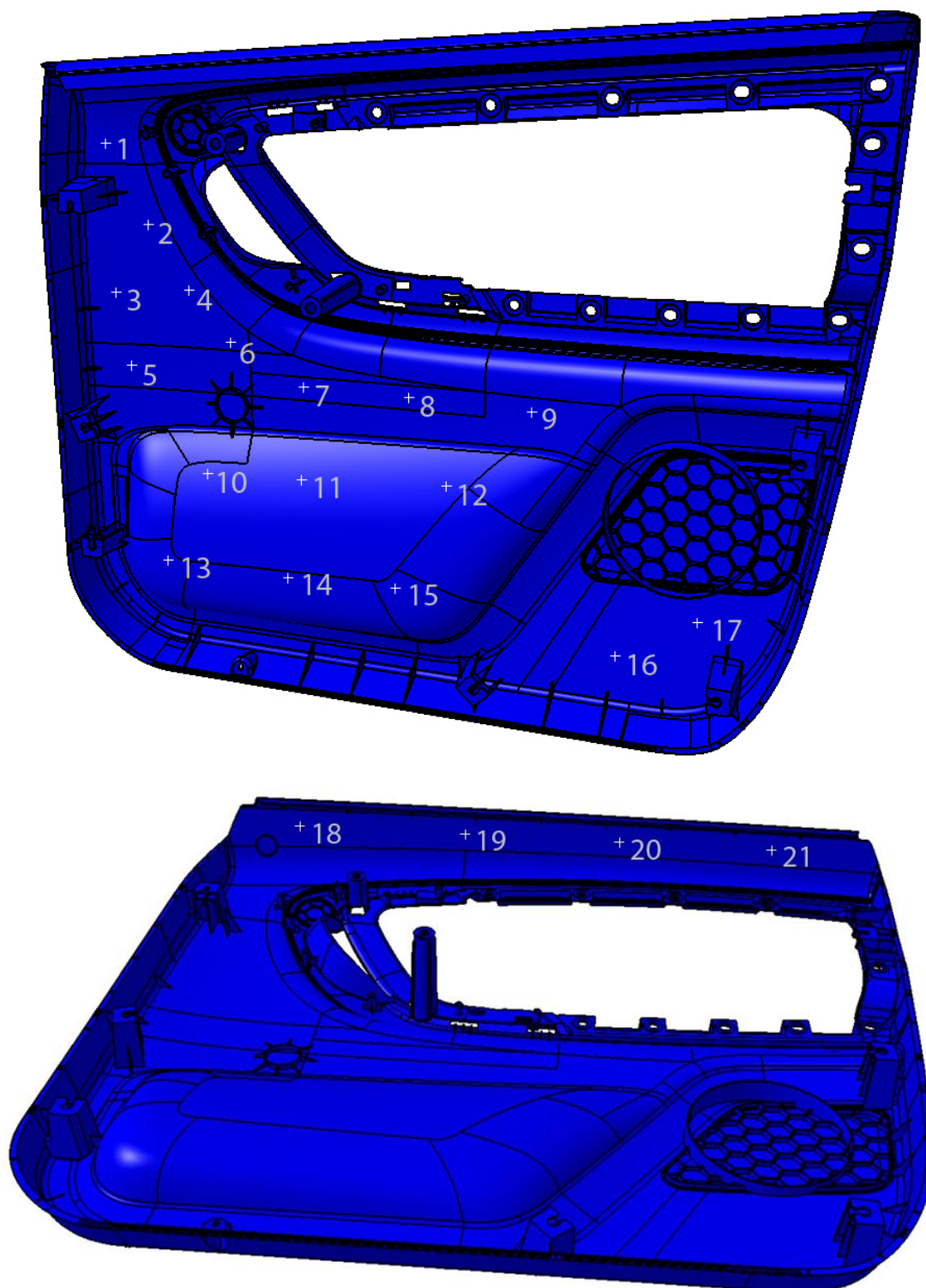
17. Běhálek, L., Ausperger, A., Lenfeld, P., Půta, J. Effect of Heat-Pipe and High-Conductivity Materials on the Temperature Fields and Skin-Core Morphology of Plastic Parts. In *Technomer 2007, Chemnitz 15.-17.11.2007*. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2007, s. 138.
ISBN 978-3939382-08-09.
18. Lenfeld, P., Ausperger, A., Běhálek, L., Půta, J. Monitoring and Efficiency Evaluation of GWK Cooling System. In *Technomer 2007, Chemnitz 15.-17.11.2007*. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2007, s. 143.
ISBN 978-3939382-08-09.
19. Lenfeld P., Půta, J., Seidl, M. Injection Moulding of Plastics Parts with Talc and with the Blowing Agent. In *Vstřikování plastů, Praha 13.-14.3.2008*. Praha: Plast Form Service, s.r.o., 2008, s. 29-32. ISSN 1213-2632.
20. Lenfeld, P., Půta, J., Seidl, M. Chlazení vstřikovacích forem pomocí CO₂. In *Sborník mezinárodní konference „FORMY 08“, Brno, 13.6.2008*. Brno: Uniplast Brno, 2008. ISBN 80-7318-009-X.
21. Seidl, M. – Půta, J. - Lenfeld, P. The monitoring of CO₂ cooling influence on changes of temperature field on plastic molded part. In *Sborník abstraktů mezinárodní konference „ERIN 2008“, Bratislava 23.-24.4.2008*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2008, s. II-36. ISBN 978-80-227-2849-2.
22. Půta, J., Lenfeld, P. Influence the Parameters of Closable Edges the Family Mould on Melt Cavity Pressure. In *International Scientific Conference “Material Science and Manufacturing Technology, MiTech08, Praha 26.-27.6.2008*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, s. 194-196. ISBN 978-80-213-1792-5.

7 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Měřená místa a naměřené hodnoty při analýze pevnosti ve střihu
- Příloha 2** Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího stroje
 C_m, C_{mk}
- Příloha 3** Vypočtené hodnoty indexů způsobilosti procesu C_p a C_{pk} u krátkodobých zkoušek
- Příloha 4** Hodnoty testovacího kritéria pro analýzu rozptylu při jednoduchém třídění
- Příloha 5** Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p, C_{pk} v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování
- Příloha 6** Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p, C_{pk} , v případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

Příloha 1 str. 1/3

Měřená místa a naměřené hodnoty při analýze pevnosti ve střihu



Body měřené při analýze pevnosti ve střihu

Příloha 1 str. 2/3

Měřená místa a naměřené hodnoty při analýze pevnosti ve střihu

Pevnost ve střihu u výstřiků vyrobených technologií konvenčního kaskádového vstřikování

	Pevnost ve střihu τ_s [MPa]						
	číslo měření						
bod	1	2	3	4	5	\bar{x}	σ
1	29,39	29,28	29,48	28,96	29,02	29,23	0,23
2	30,94	30,94	30,19	30,45	30,8	30,66	0,33
3	31,3	31,2	30,97	30,67	30,57	30,94	0,32
4	32,06	31,37	32,2	31,35	31,23	31,64	0,45
5	30,45	30,96	30,89	31,22	30,61	30,83	0,30
6	31,21	31,42	31,95	31,94	31,57	31,62	0,32
7	30,86	31,46	31,43	31,46	31,06	31,25	0,28
8	32,15	31,22	31,31	31,31	31,93	31,58	0,43
9	32,02	31,29	31,36	31,96	32,1	31,75	0,39
10	30,91	30,39	30,43	31,14	31,05	30,78	0,35
11	30,13	30,71	30,1	30,43	30,59	30,39	0,27
12	29,65	29,99	30,62	30,18	30,38	30,16	0,37
13	30	29,35	30,2	29,58	29,98	29,82	0,35
14	30,08	30,07	29,83	29,68	30,39	30,01	0,27
15	30,9	30,14	31,05	30,27	30,24	30,52	0,42
16	32,62	32,63	32,17	32,28	32,88	32,52	0,29
17	33,08	32,59	32,42	32,42	33,06	32,71	0,33
18	28,74	29,16	29,64	29,11	29,7	29,27	0,40
19	31,28	30,63	30,68	30,47	31,21	30,85	0,37
20	31,23	30,6	31,25	30,42	30,8	30,86	0,37
21	29,39	29,28	29,48	28,96	29,02	30,99	0,38
					$V_{\bar{x}}$	0,0296	

Příloha 1 str. 3/3

Měřená místa a naměřené hodnoty při analýze pevnosti ve střihu

Pevnost ve střihu u výstřiků vyrobených technologií řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

	Pevnost ve střihu τ_s [MPa]						
	číslo měření						
bod	1	2	3	4	5	\bar{x}	σ
1	29,51	29,41	29,6	28,99	28,71	29,24	0,38
2	29,86	29,49	30,15	29,53	30,06	29,82	0,30
3	29,66	29,6	28,99	29,17	28,93	29,27	0,34
4	30,47	29,81	30,42	29,81	30,46	30,19	0,35
5	29,77	29,13	29,19	29,88	29,09	29,41	0,38
6	30,42	30,21	29,69	29,59	30,33	30,05	0,38
7	29,77	29,83	30,42	30,37	30,26	30,13	0,31
8	30,45	29,87	30,06	30,58	29,84	30,16	0,34
9	31,02	30,34	31,06	30,36	30,68	30,69	0,35
10	29,94	29,39	29,36	29,95	29,95	29,72	0,31
11	29,98	29,87	30,29	30,39	29,62	30,03	0,31
12	30,29	30,45	29,78	29,81	30,54	30,17	0,36
13	29,78	29,91	29,87	29,06	29,11	29,55	0,42
14	30,31	30,48	29,92	29,76	29,97	30,09	0,30
15	29,75	30,48	30,44	29,91	30,5	30,22	0,36
16	30,54	29,95	30,1	30,79	30,19	30,31	0,34
17	30,82	30,12	30,92	30,07	30,67	30,52	0,40
18	28,87	28,68	29,54	29,41	29,27	29,15	0,37
19	28,91	29,01	29,04	29,7	29,76	29,28	0,41
20	28,91	29,44	29,53	28,88	29,47	29,25	0,32
21	29,92	29,18	29,88	29,33	29,46	29,55	0,33
					$v_{\bar{x}}$	0,0155	

Příloha 2 str. 1/3

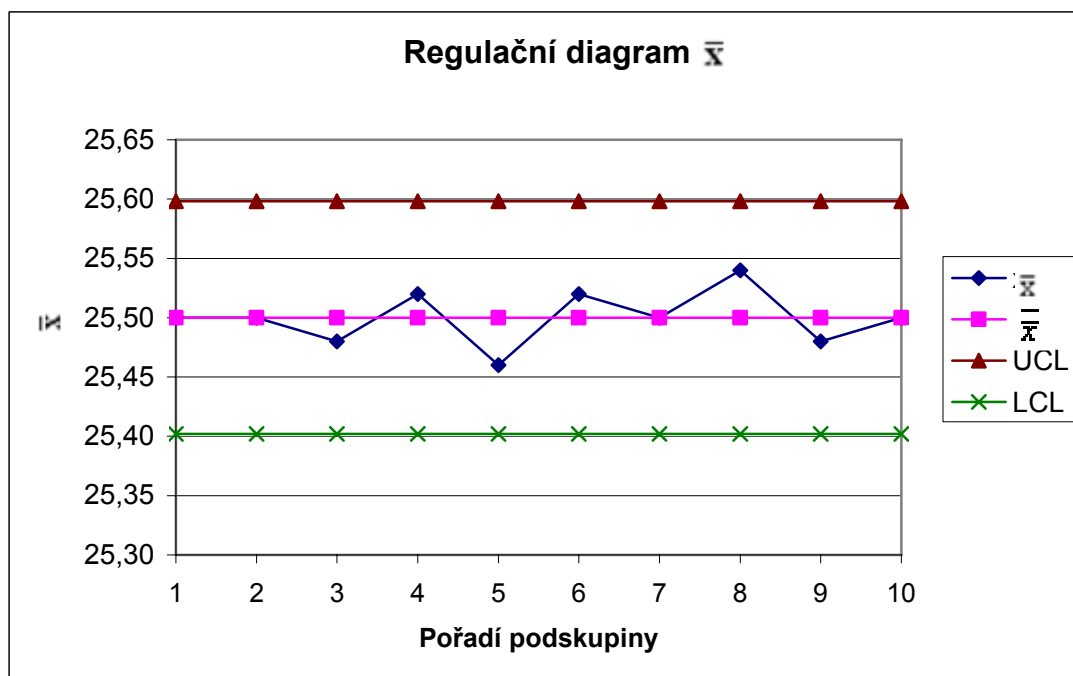
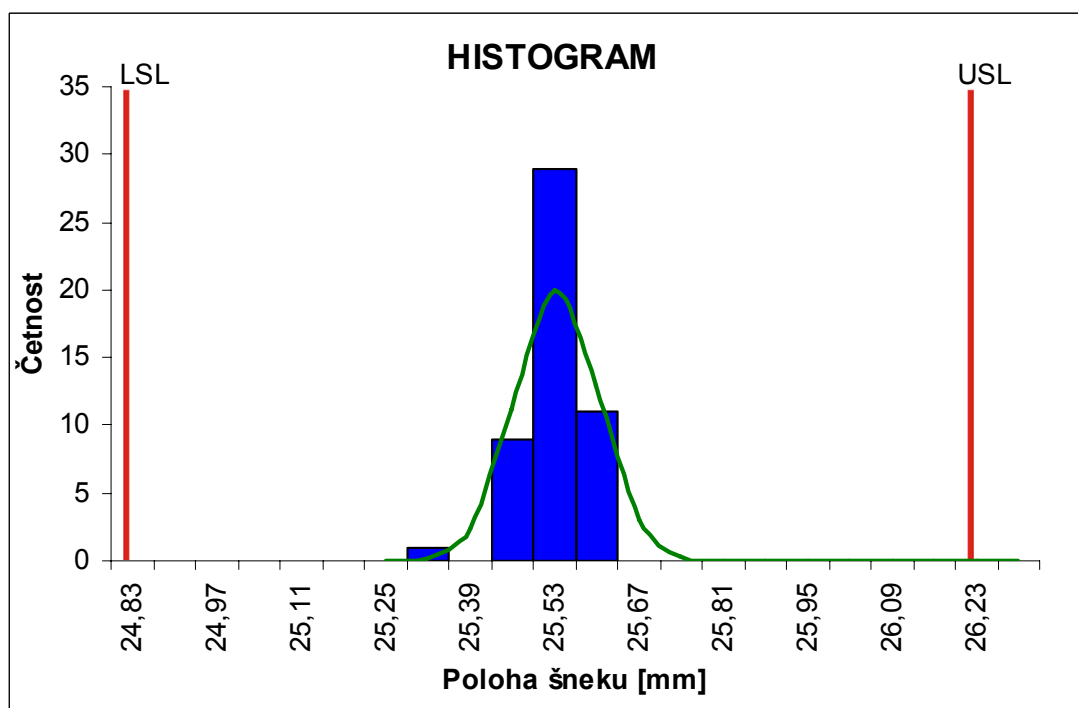
Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího stroje C_m , C_{mk}

Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R	Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R
1	25,50	1	25,50	0,20	26	25,60	6	25,52	0,20
2	25,50				27	25,40			
3	25,40				28	25,50			
4	25,50				29	25,50			
5	25,60				30	25,60			
6	25,50	2	25,50	0,00	31	25,40	7	25,50	0,20
7	25,50				32	25,60			
8	25,50				33	25,50			
9	25,50				34	25,50			
10	25,50				35	25,50			
11	25,50	3	25,48	0,30	36	25,50	8	25,54	0,10
12	25,50				37	25,50			
13	25,50				38	25,60			
14	25,60				39	25,50			
15	25,30				40	25,60			
16	25,60	4	25,52	0,20	41	25,40	9	25,48	0,10
17	25,50				42	25,50			
18	25,60				43	25,50			
19	25,40				44	25,50			
20	25,50				45	25,50			
21	25,40	5	25,46	0,20	46	25,50	10	25,50	0,20
22	25,40				47	25,50			
23	25,50				48	25,60			
24	25,60				49	25,40			
25	25,40				50	25,50			

Ověření předpokladu normálního rozdělení testem dobré shody χ^2 na 5 % hladině významnosti: $\chi^2 = 0,494 < 22,362 = \chi^2_{0,05}(13)$

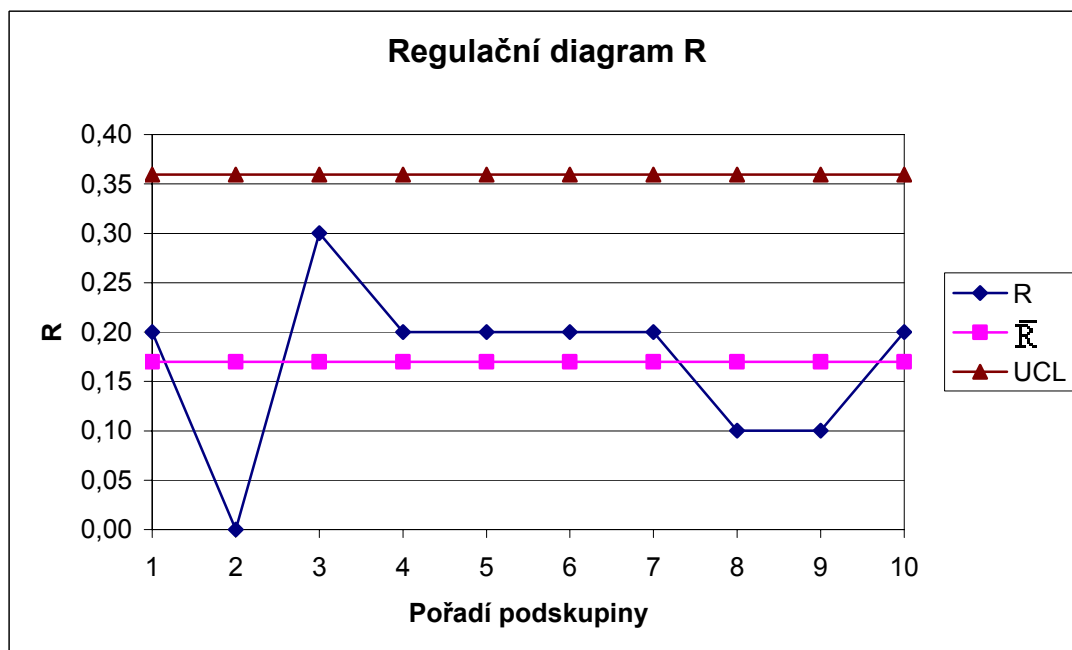
Příloha 2 str. 2/3

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího stroje C_m , C_{mk}



Příloha 2 str. 3/3

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího stroje C_m , C_{mk}



Příloha 3 str. 1/3

Vypočtené hodnoty indexů způsobilosti procesu C_p a C_{pk} u krátkodobých zkoušek

Index způsobilosti C_p	Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému - dveřní výplň levá	Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému - dveřní výplň pravá	Konvenční kaskádové vstřikování - dveřní výplň levá	Konvenční kaskádové vstřikování - dveřní výplň pravá
Hmotnost nosiče, A	2,49	2,49	3,27	2,70
Hmotnost nosiče, B	2,60	2,54	3,10	3,30
Hmotnost nosiče, C	1,75	2,18	2,50	2,64
Hmotnost kapsy, A	2,70	2,20	3,19	3,75
Hmotnost kapsy, B	2,77	2,66	3,54	3,28
Hmotnost kapsy, C	2,76	2,48	3,71	3,44
MP1, A	1,30	1,24	1,37	1,34
MP1, B	1,36	1,70	1,19	1,39
MP1, C	1,31	1,54	1,38	1,48
MP2, A	1,58	2,12	1,45	1,73
MP2, B	2,66	2,49	1,54	1,67
MP2, C	1,57	2,01	1,63	1,75
MP3, A	2,30	2,37	2,85	1,72
MP3, B	3,19	3,52	3,18	2,63
MP3, C	2,49	3,05	2,26	2,83
MP4, A	0,98	0,72	1,21	1,79
MP4, B	2,44	2,36	1,73	1,79
MP4, C	1,24	1,81	1,82	1,74
MP5, A	1,50	2,80	3,05	1,86
MP5, B	3,38	2,86	2,99	3,01
MP5, C	3,53	2,86	1,89	2,42
MP6, A	1,66	1,42	2,24	2,22
MP6, B	2,46	2,04	1,94	1,78
MP6, C	2,45	2,69	1,92	2,19

Příloha 3 str. 2/3

Vypočtené hodnoty indexů způsobilosti procesu C_p a C_{pk} u krátkodobých zkoušek

Index způsobilosti C_{pL}	Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému - dveřní výplň levá	Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému - dveřní výplň pravá	Konvenční kaskádové vstřikování - dveřní výplň levá	Konvenční kaskádové vstřikování - dveřní výplň pravá
Hmotnost nosiče, A	3,41	3,28	3,68	2,68
Hmotnost nosiče, B	1,43	1,56	2,10	2,95
Hmotnost nosiče, C	1,65	2,33	2,48	2,41
Hmotnost kapsy, A	2,97	2,38	3,34	3,62
Hmotnost kapsy, B	2,66	2,75	3,36	3,34
Hmotnost kapsy, C	2,63	2,19	3,56	3,48
MP1, A	1,33	1,48	1,18	1,29
MP1, B	0,81	1,57	1,03	1,27
MP1, C	1,58	1,34	1,76	1,66
MP2, A	1,41	2,53	1,63	1,46
MP2, B	2,70	2,96	1,77	2,03
MP2, C	1,71	1,25	1,18	1,73
MP3, A	2,27	2,32	2,87	1,68
MP3, B	3,12	3,91	2,77	2,20
MP3, C	2,62	3,94	2,56	3,23
MP4, A	1,26	0,75	1,00	1,78
MP4, B	2,11	2,20	1,60	1,46
MP4, C	1,08	1,88	2,29	2,03
MP5, A	1,83	2,75	3,03	1,74
MP5, B	3,15	2,66	2,94	3,04
MP5, C	3,72	3,13	1,92	2,52
MP6, A	2,07	2,01	2,05	2,17
MP6, B	1,79	1,39	1,86	1,76
MP6, C	2,49	2,35	2,19	2,23

Příloha 3 str. 3/3

Vypočtené hodnoty indexů způsobilosti procesu C_p a C_{pk} u krátkodobých zkoušek

Index způsobilosti C_{pU}	Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému - dveřní výplň levá	Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému - dveřní výplň pravá	Konvenční kaskádové vstřikování - dveřní výplň levá	Konvenční kaskádové vstřikování - dveřní výplň pravá
Hmotnost nosiče, A	1,58	1,27	2,87	2,72
Hmotnost nosiče, B	3,77	3,52	2,66	2,45
Hmotnost nosiče, C	1,84	2,04	2,51	2,86
Hmotnost kapsy, A	2,44	2,02	3,04	3,88
Hmotnost kapsy, B	2,88	2,57	3,72	3,22
Hmotnost kapsy, C	2,88	2,76	3,86	3,39
MP1, A	1,27	1,00	1,55	1,39
MP1, B	1,92	1,82	1,34	1,50
MP1, C	1,04	1,73	1,00	1,30
MP2, A	1,75	1,71	1,27	2,00
MP2, B	2,63	2,01	1,31	1,31
MP2, C	1,44	2,78	2,09	1,77
MP3, A	2,33	2,43	2,83	1,77
MP3, B	3,27	3,12	3,58	3,06
MP3, C	2,37	2,16	1,96	2,42
MP4, A	0,71	0,69	1,43	1,80
MP4, B	2,76	2,51	1,86	2,12
MP4, C	1,39	1,74	1,35	1,44
MP5, A	1,18	2,86	3,07	1,99
MP5, B	3,60	3,06	3,03	2,99
MP5, C	3,33	2,59	1,87	2,33
MP6, A	1,25	0,83	2,43	2,28
MP6, B	3,12	2,69	2,02	1,80
MP6, C	2,41	3,02	1,65	2,14

Příloha 4

Hodnoty testovacího kritéria pro analýzu rozptylu při jednoduchém třídění

Testovací kritérium	Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému	Konvenční kaskádové vstřikování
Hmotnost nosiče levého	75,51	9,79
Hmotnost nosiče pravého	69,68	5,56
MP1, levý	21,33	9,02
MP1, pravý	6,02	2,16
MP2, levý	2,56	13,11
MP2, pravý	49,83	9,907
MP3, levý	1,05	11,57
MP3, pravý	19,71	5,91
MP4, levý	8,45	11,28
MP4, pravý	0,43	9,04
MP5, levý	9,44	0,12
MP5, pravý	5,6	1,49
Hmotnost kapsy levé	4,79	2,31
Hmotnost kapsy pravé	5,69	1,06
MP6, levý	27,22	5,49
MP6, pravý	30,55	0,22

Příloha 5 str. 1/4

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p , C_{pk} v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování

Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R	Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R
1	651,50	1	651,45	0,12	36	651,51	8	651,46	0,12
2	651,44				37	651,47			
3	651,50				38	651,39			
4	651,45				39	651,48			
5	651,38				40	651,46			
6	651,40	2	651,48	0,15	41	651,42	9	651,43	0,22
7	651,55				42	651,57			
8	651,45				43	651,35			
9	651,50				44	651,40			
10	651,48				45	651,39			
11	651,47	3	651,41	0,12	46	651,48	10	651,45	0,09
12	651,42				47	651,46			
13	651,35				48	651,39			
14	651,40				49	651,44			
15	651,42				50	651,48			
16	651,39	4	651,43	0,11	51	651,46	11	651,45	0,10
17	651,47				52	651,40			
18	651,41				53	651,42			
19	651,50				54	651,48			
20	651,39				55	651,50			
21	651,44	5	651,47	0,11	56	651,47	12	651,47	0,13
22	651,48				57	651,49			
23	651,46				58	651,47			
24	651,53				59	651,39			
25	651,42				60	651,52			
26	651,38	6	651,45	0,14	61	651,48	13	651,47	0,16
27	651,43				62	651,42			
28	651,42				63	651,47			
29	651,52				64	651,41			
30	651,48				65	651,57			
31	651,42	7	651,42	0,08	66	651,35	14	651,43	0,15
32	651,38				67	651,47			
33	651,45				68	651,41			
34	651,46				69	651,50			
35	651,39				70	651,44			

Příloha 5 str. 2/4

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p , C_{pk} v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování

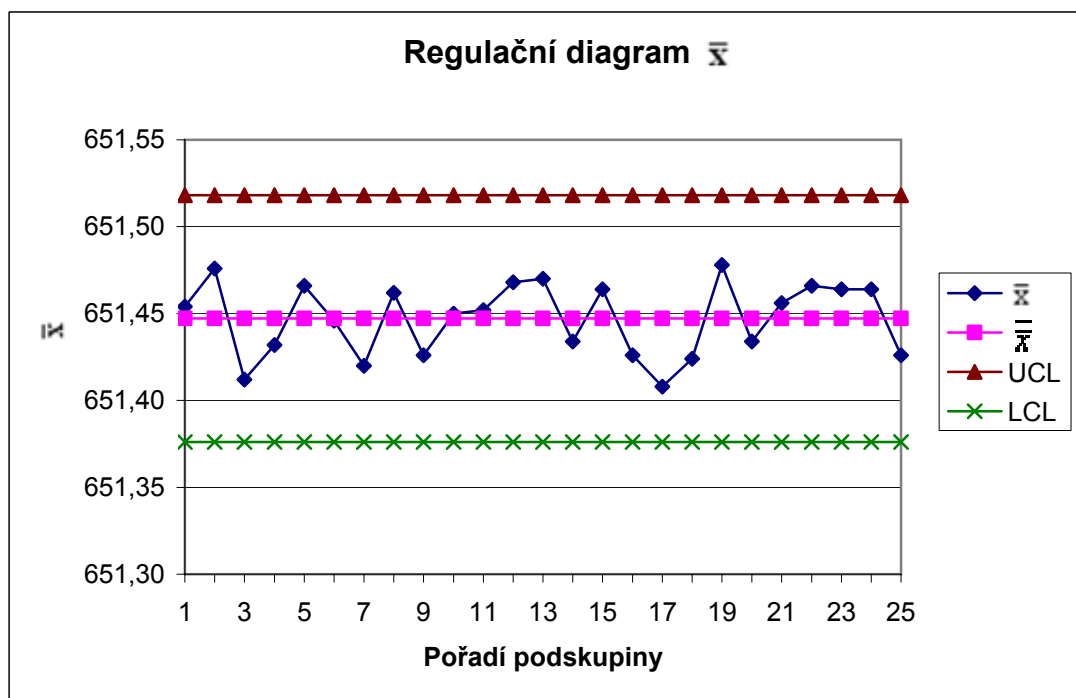
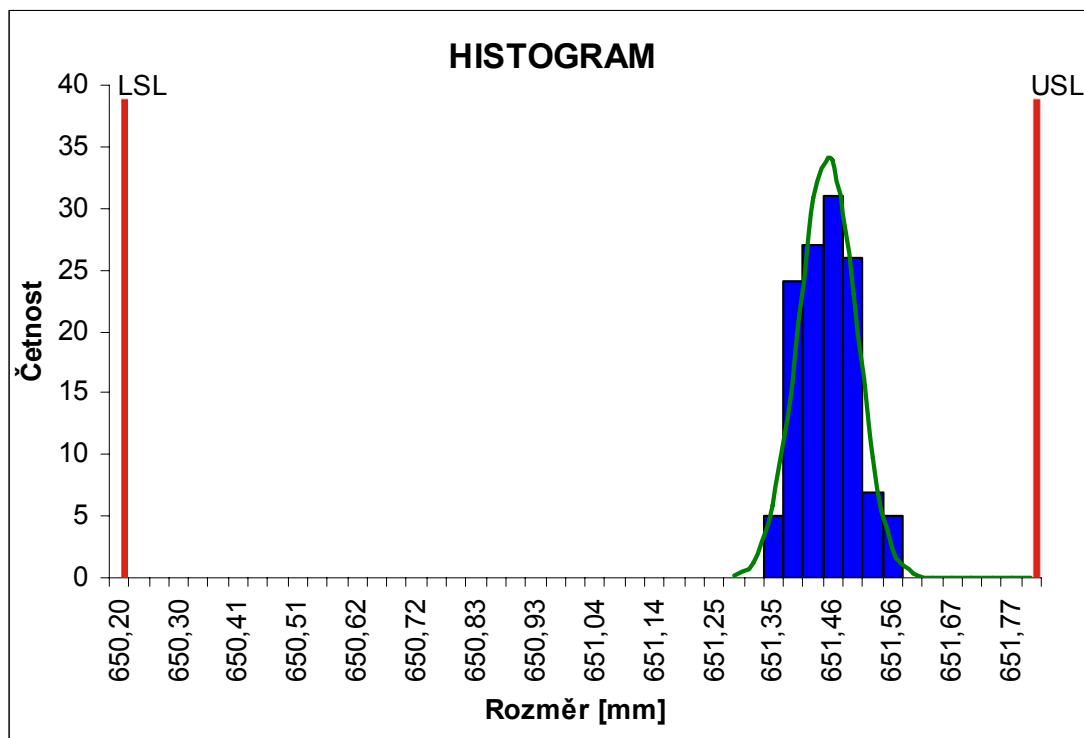
Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R	Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R
71	651,50	15	651,46	0,08	101	651,39	21	651,46	0,13
72	651,45				102	651,52			
73	651,48				103	651,48			
74	651,47				104	651,42			
75	651,42				105	651,47			
76	651,35	16	651,43	0,15	106	651,41	22	651,47	0,11
77	651,40				107	651,50			
78	651,47				108	651,52			
79	651,41				109	651,48			
80	651,50				110	651,42			
81	651,39	17	651,41	0,05	111	651,52	23	651,46	0,22
82	651,42				112	651,41			
83	651,38				113	651,57			
84	651,43				114	651,35			
85	651,42				115	651,47			
86	651,50	18	651,42	0,12	116	651,50	24	651,46	0,11
87	651,39				117	651,47			
88	651,42				118	651,49			
89	651,38				119	651,47			
90	651,43				120	651,39			
91	651,47	19	651,48	0,16	121	651,42	25	651,43	0,06
92	651,41				122	651,43			
93	651,57				123	651,42			
94	651,50				124	651,40			
95	651,44				125	651,46			
96	651,39	20	651,43	0,09					
97	651,44								
98	651,48								
99	651,46								
100	651,40								

Ověření předpokladu normálního rozdělení naměřených hodnot testem dobré shody

χ^2 na 5 % hladině významnosti: $\chi^2 = 0,877 < 22,362 = \chi^2_{0,05}(13)$

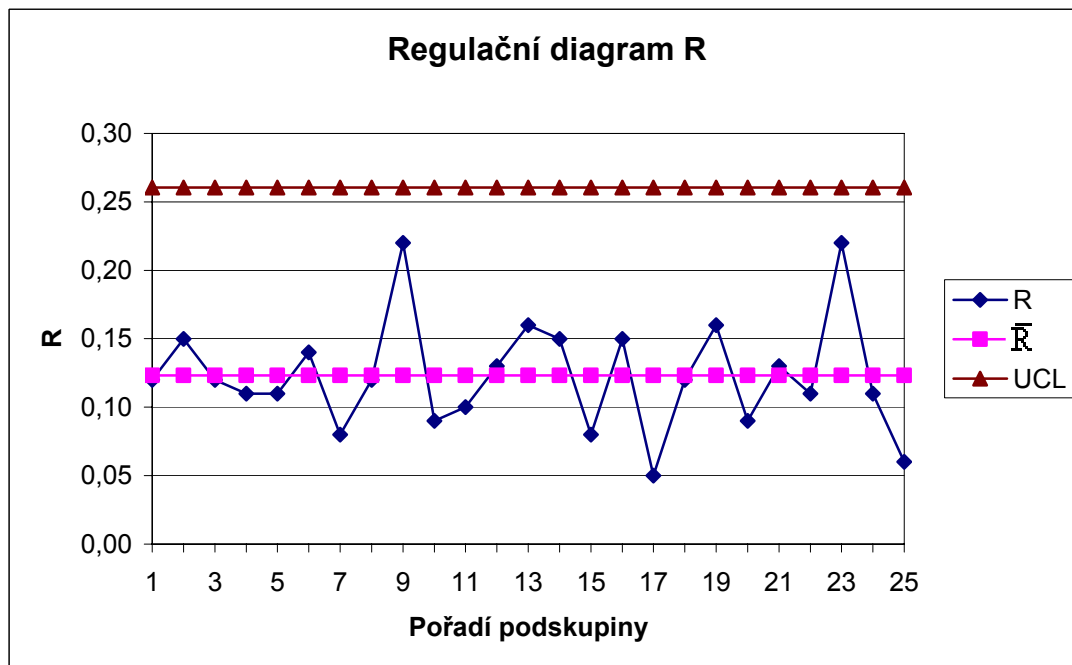
Příloha 5 str. 3/4

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p , C_{pk} v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování



Příloha 5 str. 4/4

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p , C_{pk} v případě technologie konvenčního kaskádového vstřikování



Příloha 6 str. 1/4

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p , C_{pk} v případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R	Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R
1	651,40	1	651,38	0,19	36	651,37	8	651,47	0,18
2	651,41				37	651,55			
3	651,44				38	651,45			
4	651,41				39	651,47			
5	651,25				40	651,52			
6	651,44	2	651,40	0,07	41	651,42	9	651,45	0,19
7	651,40				42	651,36			
8	651,37				43	651,46			
9	651,40				44	651,47			
10	651,37				45	651,55			
11	651,47	3	651,36	0,22	46	651,37	10	651,42	0,27
12	651,42				47	651,45			
13	651,25				48	651,52			
14	651,27				49	651,25			
15	651,39				50	651,50			
16	651,35	4	651,36	0,04	51	651,52	11	651,46	0,09
17	651,36				52	651,43			
18	651,35				53	651,47			
19	651,34				54	651,47			
20	651,38				55	651,43			
21	651,29	5	651,31	0,13	56	651,40	12	651,43	0,20
22	651,38				57	651,35			
23	651,29				58	651,37			
24	651,35				59	651,50			
25	651,25				60	651,55			
26	651,24	6	651,32	0,16	61	651,57	13	651,48	0,21
27	651,29				62	651,37			
28	651,34				63	651,52			
29	651,33				64	651,56			
30	651,40				65	651,36			
31	651,31	7	651,45	0,34	66	651,61	14	651,44	0,24
32	651,30				67	651,37			
33	651,64				68	651,40			
34	651,44				69	651,37			
35	651,55				70	651,47			

Příloha 6 str. 2/4

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p , C_{pk} v případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

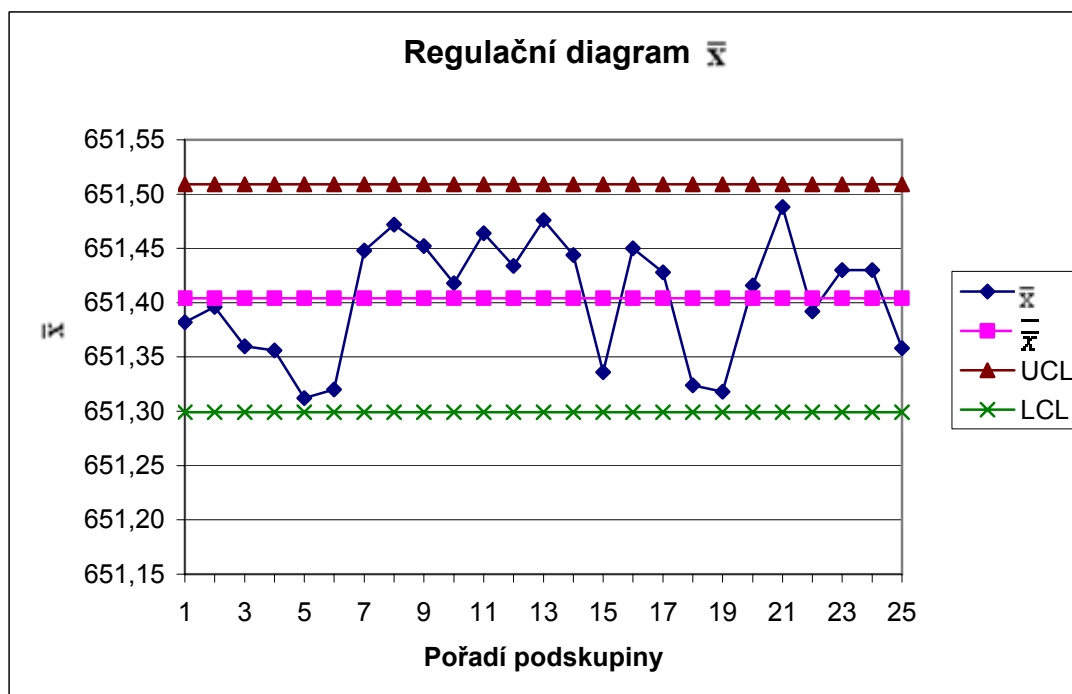
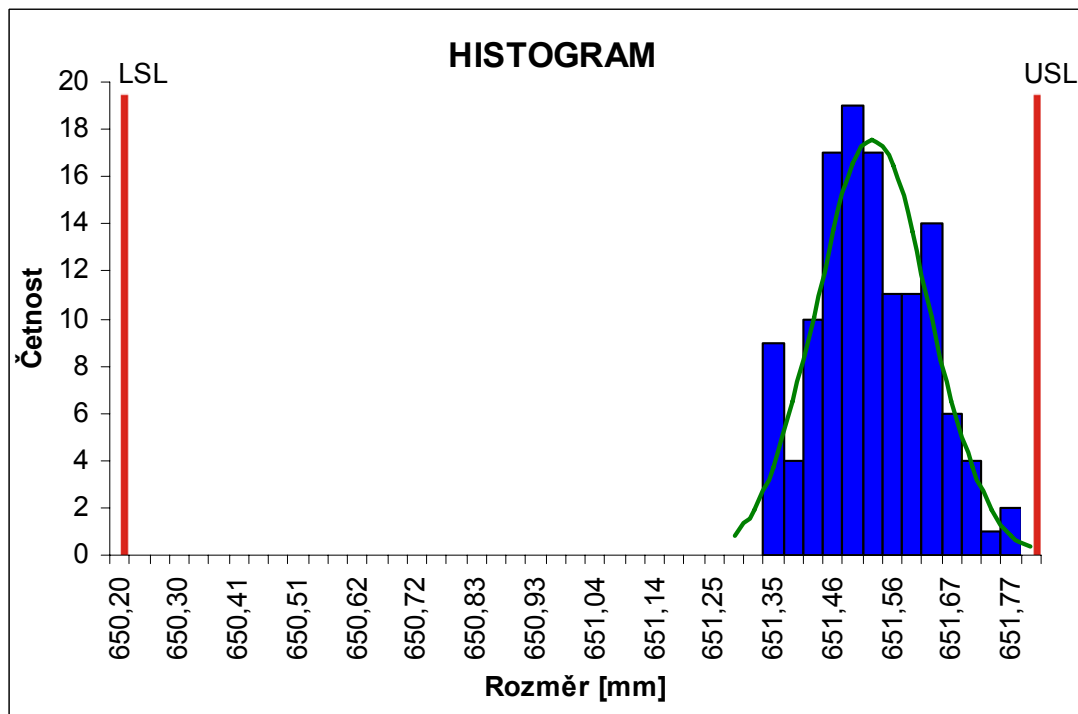
Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R	Číslo měření	Rozměr [mm]	Číslo skupiny	\bar{x}	R
71	651,42	15	651,34	0,17	101	651,49	21	651,49	0,07
72	651,25				102	651,48			
73	651,27				103	651,50			
74	651,39				104	651,45			
75	651,35				105	651,52			
76	651,36	16	651,45	0,21	106	651,35	22	651,39	0,22
77	651,35				107	651,36			
78	651,56				108	651,35			
79	651,49				109	651,34			
80	651,49				110	651,56			
81	651,55	17	651,43	0,30	111	651,40	23	651,43	0,11
82	651,37				112	651,47			
83	651,45				113	651,39			
84	651,52				114	651,50			
85	651,25				115	651,39			
86	651,25	18	651,32	0,14	116	651,47	24	651,43	0,16
87	651,27				117	651,36			
88	651,39				118	651,36			
89	651,35				119	651,44			
90	651,36				120	651,52			
91	651,35	19	651,32	0,07	121	651,29	25	651,36	0,22
92	651,34				122	651,25			
93	651,33				123	651,47			
94	651,29				124	651,43			
95	651,28				125	651,35			
96	651,29	20	651,42	0,35					
97	651,31								
98	651,30								
99	651,64								
100	651,54								

Ověření předpokladu normálního rozdělení naměřených hodnot testem dobré shody

χ^2 na 5 % hladině významnosti: $\chi^2 = 0,231 < 22,362 = \chi^2_{0,05}(13)$

;Příloha 6 str. 3/4

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p , C_{pk} v případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje



Příloha 6 str. 4/4

Hodnoty pro stanovení indexů způsobilosti vstřikovacího procesu C_p , C_{pk} v případě technologie řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje

